

---

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA**

**Departamento de Proyectos de Ingeniería**

---



**CONTRIBUCIÓN A LA DETERMINACIÓN Y SIMULACIÓN DE  
LAS VIBRACIONES E IMPACTOS EN OPERACIONES DE  
TRANSPORTE Y DISTRIBUCIÓN DE PRODUCTOS DE  
CONSUMO EMBALADOS**

**TESIS DOCTORAL**

PRESENTADA POR:

**D. Manuel Alfredo García-Romeu Martínez**

DIRIGIDA POR:

**Dr. Vicente Agustín Cloquell Ballester**







*A mis abuelos y abuelas, Emilio, Mamabel, Manolo y Conchi, al que no está por tantas cosas que debería haber visto y que no ha podido ver, al que me acompaña por la fuerza que me da y la confianza que deposita en mí. A ellos y a ella por su cariño y entrega.*

*A mis padres, Pepe y Conchi, que a ellos les debo cuanto soy. A mamá, por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor. A papá por los ejemplos de perseverancia y constancia que lo caracterizan y que me ha infundido siempre, por el valor mostrado para salir adelante y por su amor.*

*A mis hermanos, José y Ada, el encontrar un momento para reunirnos a veces no era nada fácil, pero el poder compartir juntos siempre valía la pena.*

*A mis amigos, y en general, a todos aquellos a los que quiero. A los que veo a menudo y a los que no he encontrado el momento de ello.*

*A Silvia, por ser, por estar, por existir.*



## AGRADECIMIENTOS

---

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Fondo Social Europeo (FSE) a través del programa Operativo Integrado de la Comunidad Valenciana (POICV) 2000-2006 como investigador participante en el programa de Alta Especialización en Tecnologías Industriales del IMPIVA en su actuación 1 de mantenimiento de líneas de investigación aplicada, y por ITENE (Instituto Tecnológico del Embalaje, Transporte y Logística).

A título personal me gustaría dejar constancia de mi gratitud a todo lo que el director de la tesis, el Dr. Vicente Cloquell Ballester, ha hecho para que este trabajo sea una realidad y a Javier Zabaleta Meri, Director General de ITENE, por darme la oportunidad de poder realizarlo con los más altos expertos en el conocimiento de la Ingeniería del Embalaje, Transporte y Distribución; permitiéndome un total de 15 meses de estancia en la School of Packaging (Michigan State University, Michigan, EEUU) y la School of Architectural, Civil and Mechanical (Victoria University, Melbourne, Australia); centros en los que se concentran los principales investigadores en el área del trabajo realizado.

Siguiendo con nombres propios me gustaría dejar patente la satisfacción y el honor de haber trabajado estrechamente con personas de tan alto nivel científico y a la vez humano, como el Dr. Vincent Rouillard y el Dr. Michael Sek, de la School of Architectural, Civil and Mechanical (Victoria University, Australia). Durante mi estancia de 8 meses en Australia han sido mi familia, mis amigos y mis referentes.

También agradecer la ayuda y participación del Dr. Paul Singh, en la realización de las investigaciones llevadas a cabo en la School of Packaging (Michigan State University, Michigan, EEUU), durante mi estancia de 7 meses en EEUU. Ha sido un honor colaborar con uno de los más reconocidos investigadores a nivel mundial en el campo de la Ingeniería del Embalaje, Transporte y Distribución.

Quiero manifestar mi agradecimiento a José Luis Argudo, Pankaj Gaur, Koushik Saha, Vicente Rosalen Sancayetano de Pallas y Gadea y a Asecomex, porque sin su inestimable tiempo y ayuda, la investigación correspondiente al artículo publicado del compendio, nº1, no hubiera sido posible llevarlo a buen término. También agradecer, a los responsables de las empresas Salvaplast (Salvador Sebastia) y Romavesan (Atanasio Sanchez Olaeta y Antonio Ocaña Caballero), a los conductores de los trailers y a Alejandro Márquez Montero, por que sin ellos, la investigación correspondiente al artículo publicado del compendio, nº2, no hubiera podido realizarse.

Por último, agradecer al Dr. Paul Singh, al CDPR (Consortium of Distribution Packaging Research) y a ITENE, por proporcionar la instrumentación necesaria para la realización de las investigaciones correspondientes a los artículos publicados del compendio, nº1, nº2 y nº3. Y agradecer al Dr. Vincent Rouillard y al Dr. Michael Sek, por proporcionar la instrumentación correspondiente a los artículos publicados del compendio, nº4, nº5 y nº6.

## RESUMEN

---

El trabajo que a continuación se presenta se acoge a la modalidad de tesis por compendio de publicaciones del Departamento de Proyectos de Ingeniería de la Universidad Politécnica de Valencia. Consta de seis artículos, de los cuales, dos de ellos han sido publicados en la revista “Packaging Technology and Science”, otros dos artículos publicados en “Advances in Experimental Mechanics Vols 7-8”, un quinto artículo publicado en “World Congress on Engineering 2007, Vols 1 and 2” y un sexto artículo enviado y pendiente de ser aceptado en la revista “Packaging Technology and Science”. El nexo común que los une es el de profundizar en la generación de nuevo conocimiento dentro del campo de la ingeniería del embalaje, siendo su objetivo final, el de mejorar las técnicas actuales de simulación de los riesgos transmitidos al producto y su embalaje en los procesos de transporte y distribución.

Las investigaciones planteadas y detalladas en cada uno de los artículos pretenden aportar una contribución parcial a un objetivo tan ambicioso como el planteado. Uno de los abusos mecánicos importantes, aplicado al producto embalado durante el proceso de transporte y distribución, son

los impactos o caídas a los que son sometidos los productos embalados. El primer artículo de investigación se ha centrado en la medida y análisis de estos impactos recibidos por productos embalados que son enviados por avión mediante empresas transportistas de paquetería (DHL y FedEx) entre Europa y USA, obteniendo datos necesarios para simular en laboratorio las condiciones intercontinentales del transporte de paquetería para el correcto diseño de los embalajes de protección.

La severidad de los impactos a menudo se describe en función de su altura de caída-libre equivalente (EDH) y de la orientación del impacto, para así facilitar los ensayos de caída en laboratorio. El enfoque generalmente utilizado es utilizar un paquete que contiene un registrador de aceleraciones y procesar los datos obtenidos para obtener una distribución estadística de las alturas de caída esperadas en el proceso de distribución. Es por ello que el artículo tercero de investigación se ha centrado en obtener el método de estimación de la EDH más preciso, el cual se consigue cuando está basado en el uso del parámetro del cambio total de velocidad durante el impacto. Los métodos basados en la velocidad de impacto para el cálculo de la EDH no deberían de ser utilizados debido al elevado error que introducen en su estimación.

Puesto que los embalajes de amortiguamiento que sirven de protección a los productos en los procesos de transporte y distribución, son calculados y diseñados teniendo en cuenta la altura máxima de caída esperada, la cual es obtenida mediante estimación de la EDH, es importante estimar los ambientes de distribución de forma correcta. Debido al impacto negativo medioambiental de los materiales utilizados como amortiguamiento de productos embalados, tales como el poliestireno expandido, está habiendo un creciente interés en uno de los materiales más disponible y renovable, el papel, como sustituto. En el artículo sexto de investigación se ha demostrado que materiales de amortiguamiento desarrollados con cartón ondulado precomprimido multi-capa es una alternativa factible como protección de los productos ante impactos repetitivos frente a los materiales poliméricos menos respetuosos con el medio ambiente, teniendo a su vez un excelente comportamiento en cuanto aceleración máxima transmitida y respuesta en frecuencia.

Otro abuso mecánico importante, aplicado al producto embalado durante el proceso de transporte y distribución, es la compresión dinámica a la que son sometidos los embalajes. El cuarto artículo de investigación se ha centrado en la obtención de un método mediante el cual se pueda cuantificar la aptitud de un embalaje de cartón ondulado para soportar

cargas dinámicas de compresión por largos periodos de tiempo. Actualmente no hay establecido un método por el cual se pueda medir la capacidad que tiene un embalaje de cartón ondulado en soportar cargas dinámicas de compresión por periodos largos. No obstante, se ha demostrado, que el daño acumulado en embalajes de cartón ondulado sometidos continuamente a cargas de compresión dinámicas aleatorias, puede ser obtenido mediante la evaluación de los parámetros modales del sistema extraídos de su función de respuesta en frecuencia.

El segundo artículo se ha centrado en la obtención y análisis de los niveles de vibración que se transmite a la mercancía en el transporte por carretera. Las vibraciones producidas por vehículos dependen en gran medida de variables como el nivel de carga utilizada en la plataforma de carga, el tipo de suspensión neumática o mecánica de la plataforma del vehículo y de la velocidad que el vehículo está desarrollando en ese momento, como se ha demostrado en el segundo artículo de investigación de la presente tesis tras el análisis de los datos obtenidos en carreteras españolas, obteniendo funciones PSD que dependían, en general, de esas variables.

Tras demostrar en la presente tesis que es posible obtener una función PSD, cuya forma depende exclusivamente de los medios de transporte utilizados y cuyo nivel de energía, depende de la velocidad con la que el vehículo se desplaza; la principal limitación de que los procesos aleatorios de vibración a ser simulados son asumidos normalmente-distribuidos y estacionarios, al utilizar el PSD como un solo descriptor de las vibraciones producidas por vehículos en carretera, se solventa mediante la aplicación de una técnica de simulación que reproduce las variaciones de amplitud del proceso siempre que se conozca la distribución de la raíz del valor medio al cuadrado (RMS) de la señal de vibración. Por ello, el artículo quinto de investigación se ha centrado en la obtención de un nuevo modelo estadístico que describe con mayor precisión la distribución estadística de las vibraciones aleatorias generadas por vehículos en carretera y que permite a su vez el desarrollo de ensayos de simulación en laboratorio que incluyan la generación de vibraciones aleatorias de diversos niveles de energía. El nuevo modelo desarrollado describe de forma más precisa el carácter estadístico de las vibraciones aleatorias generadas por vehículos en carretera, ya que mejora de forma importante los resultados del modelo de tres parámetros de Weibull.



## RESUM

---

El treball que a continuació es presenta s'acull a la modalitat de tesi per compendi de publicacions del Departament de Projectes d'Enginyeria de la Universitat Politècnica de València. Consta de sis articles, dels quals, dos d'ells han sigut publicats en la revista "Packaging Technology and Science", altres dos articles publicats en "Advances in Experimental Mechanics Vols 7-8", un quint article publicat en "World Congress on Engineering 2007, Vols 1 and 2" i un sext article enviat i pendent de ser acceptat en la revista "Packaging Technology and Science". El nexa comú que els unix és el d'aprofundir en la generació de nou coneixement dins del camp de l'enginyeria de l'embalatge, sent el seu objectiu final, el de millorar les tècniques actuals de simulació dels riscos transmesos al producte i el seu embalatge en els processos de transport i distribució.

Les investigacions plantejades i detallades en cada un dels articles pretenen aportar una contribució parcial a un objectiu tan ambiciós com el plantejat. Un dels abusos mecànics importants, aplicat al producte embalat durant el procés de transport i distribució, són els impactes o caigudes a què són sotmesos els productes embalats. El primer article d'investigació s'ha

centrat en la mesura i anàlisi d'estos impactes rebuts per productes embalats que són enviats per avió per mitjà d'empreses transportistes de paqueteria (DHL i FedEx) entre Europa i USA, obtenint dades necessàries per a simular en laboratori les condicions intercontinentals del transport de paqueteria per al correcte disseny dels embalatges de protecció.

La severitat dels impactes sovint es descriu en funció de la seua altura de caiguda-lliure equivalent (EDH) i de l'orientació de l'impacte, per a així facilitar els assajos de caiguda en laboratori. L'enfocament generalment utilitzat és utilitzar un paquet que conté un registrador d'acceleracions i processar les dades obtingudes per a obtenir una distribució estadística de les altures de caiguda esperades en el procés de distribució. És per això que l'article tercer d'investigació s'ha centrat a obtenir el mètode d'estimació de l'EDH més precís, el qual s'aconsegueix quan està basat en l'ús del paràmetre del canvi total de velocitat durant l'impacte. Els mètodes basats en la velocitat d'impacte per al càlcul de l'EDH no deurién ser utilitzats a causa de l'elevat error que introduïxen en la seua estimació.

Ja que els embalatges d'amortiment que servixen de protecció als productes en els processos de transport i distribució, són calculats i dissenyats tenint en compte l'altura màxima de caiguda esperada, la qual és obtinguda per mitjà d'estimació de l'EDH, és important estimar els ambients de distribució de forma correcta. A causa de l'impacte negatiu mediambiental dels materials utilitzats com a amortiment de productes embalats, com ara el poliestiré expandit, està havent-hi un creixent interès en un dels materials més disponible i renovable, el paper, com a substitut. En l'article sext d'investigació s'ha demostrat que materials d'amortiment desenrotllats amb cartó ondulat precomprimit multi-capa és una alternativa factible com a protecció dels productes davant d'impactes repetitius enfront dels materials poliméricos menys respectuosos amb el medi ambient, tenint al seu torn un excel·lent comportament en tant que acceleració màxima transmesa i resposta en freqüència.

Un altre abús mecànic important, aplicat al producte embalat durant el procés de transport i distribució, és la compressió dinàmica a què són sotmesos els embalatges. El Quart article d'investigació s'ha centrat en l'obtenció d'un mètode per mitjà del qual es puga quantificar l'aptitud d'un embalatge de cartó ondulat per a suportar càrregues dinàmiques de compressió per llargs períodes de temps. Actualment no hi ha establert un mètode pel qual es puga mesurar la capacitat que té un embalatge de cartó ondulat a suportar càrregues dinàmiques de compressió per períodes llargs. No obstant això, s'ha demostrat, que el dany acumulat en

embalatges de cartó ondulat sotmesos contínuament a càrregues de compressió dinàmiques aleatòries, pot ser obtingut per mitjà de l'avaluació dels paràmetres modals del sistema extrets de la seua funció de resposta en freqüència.

El segon article s'ha centrat en l'obtenció i anàlisi dels nivells de vibració que es transmet a la mercaderia en el transport per carretera. Les vibracions produïdes per vehicles depenen en gran manera de variables com el nivell de càrrega utilitzada en la plataforma de càrrega, el tipus de suspensió pneumàtica o mecànica de la plataforma del vehicle i de la velocitat que el vehicle està desenrotllant en eixe moment, com s'ha demostrat en el segon article d'investigació de la present tesi després de l'anàlisi de les dades obtingudes en carreteres espanyoles, obtenint funcions PSD que depenien, en general, d'eixes variables.

Després de demostrar en la present tesi que és possible obtindre una funció PSD, la forma de la qual depén exclusivament dels mitjans de transport utilitzats i el nivell d'energia de la qual, depén de la velocitat amb què el vehicle es desplaça; la principal limitació que els processos aleatoris de vibració a ser simulats són assumits normalment-distribuïts i estacionaris, a l'utilitzar el PSD com un sol descriptor de les vibracions produïdes per vehicles en carretera, es resol per mitjà de l'aplicació d'una tècnica de simulació que reproduïx les variacions d'amplitud del procés sempre que es conega la distribució de l'arrel del valor mitjà al quadrat (RMS) del senyal de vibració. Per això, l'article quint d'investigació s'ha centrat en l'obtenció d'un nou model estadístic que descriu amb més precisió la distribució estadística de les vibracions aleatòries generades per vehicles en carretera i que permet al seu torn el desenrotllament d'assajos de simulació en laboratori que incloguen la generació de vibracions aleatòries de diversos nivells d'energia. El nou model desenrotllat descriu de forma més precisa el caràcter estadístic de les vibracions aleatòries generades per vehicles en carretera, ja que millora de forma important els resultats del model de tres paràmetres de Weibull.



## SUMMARY

---

This work is presented according with the modality of thesis base on summary of publications established at the Department of Engineering Projects of the Valencia University of Technology. Its consist of six research articles. Two of them have been published in the magazine “Packaging Technology and Science”, another two different research articles have been published in “Advances in Experimental Mechanics Vols 7-8”, a fith have been published in “World Congress on Engineering 2007, Vols 1 and 2” and the sixth article have been sent and it is pending the magazine “Packaging Technology and Science” decision.

The common link between the research articles is investigate thoroughly in the generation of new knowledge inside the field of packaging engineering. Its final objective is to improve the current simulation techniques of the hazards transmitted to products and packaging in the transport and distribution processes.

The investigations exposed in each of the articles, attempt to give a partial contribution to the ambitious planned objective. One of the main mechanical abuse, applied to a packaged product during the transport and

distribution processes, is the impacts which it is submitted. The first research article is focus on the measurement and analysis of these received impacts by packaged products, which are sent by air mail by means of distribution companies (DHL and FedEx) between Europe and USA. This gives the necessary data to simulate, in the laboratory, the intercontinental transport conditions of packages, in order to achieve a correct design of the protection packages.

The magnitude of the impacts usually is described as a function of its equivalent drop height (EDH) and the impact orientation, in order to facilitate the drop tests at the laboratory. Usually is used a package that contains an acceleration recorder, and the data obtained is processed to give an statistic distribution of the expected drop-height in the distribution process. That's the reason why the third research article objective has been to obtain the most accurate EDH estimation method, which is achieved when it is based on the use of the total velocity change parameter during the impact. The methods based on the impact velocity for the EDH calculation should not be used due to the high error introduced in its estimation.

Since the cushion packages which are used as product protection in the transport and distribution processes, are calculate and designed taking into account the maximum height of the expected drop, obtained by means the EDH estimation; its important to estimate correctly the distribution environment. Due to the negative environmental impact of the materials used as cushion of the package products, as the expanded polystyrene, there is a growing interest in one of the most renewable and available, the paper, as substituted. In the sixth research article have been proved that the cushion materials develop with precompressed multi-layer corrugated paperboard is a viable alternative as protection of the products against repetitive impacts in opposition to polymeric materials, which are less respectful with the environment. This is also due to the good behaviour in transmitted acceleration and frequency response of the material.

Another important mechanical abuse, applied to the packaged product during the transport and distribution processes, is the dynamic compression at which the packages are submitted. The objective of the fourth research article has been focused on obtaining a method which allows to assess the corrugated paperboard package ability to support dynamic compression loads in long time. Nowadays it has not been established a method by means the capacity of the paperboard to support dynamic compression loads in long time periods can be measured.

Nevertheless, it has been demonstrated that the accumulated damage in corrugated paperboard, which are submitted continuously to random dynamic compression loads, can be obtained through the evaluation of the system modal parameters extracted from its frequency response function.

The second research article has been focused on the analysis of the vibration levels which are transmitted to the loads in the road transportation. The vibrations produced by vehicles depend on variables as the load level used in the loading platform, the type of pneumatic or mechanic suspension of the vehicle platform and the velocity developed by the vehicle at that moment; as has been demonstrated in the PSD functions obtained in the second research article of the present thesis, after the data analysis of Spanish roads vibration records.

In the present thesis has been demonstrated that is possible to obtain a PSD function which shape depends exclusively on the transportation ways and which energy level depends on the velocity developed by the vehicle. The principal limitation of assuming a random vibration process as Gaussian-distributed and stationary when it is simulated is due to the used of a PSD function as a sole descriptor of the road vehicle vibrations. This limitation is resolved by the application of a new simulation technique that reproduce the amplitude changes of the process if the root mean square statistical distribution (RMS) of the vibration signal is known. That's the reason why the fifth research article has been focused on obtaining a new statistical model which describes with more accuracy the statistic distribution of the random vibrations generated by road vehicles, and which allows at the same time develop simulation tests in the laboratory, that includes the generation of random vibrations of different energy levels. The new developed model describes with more accuracy the statistical character of the random vibrations generated by road vehicles than the Weibull three parameters model.



## INDICE

---

AGRADECIMIENTOS	i
RESUMEN	iii
RESUM	vii
SUMMARY	xi
SIMBOLOS UTILIZADOS	xxi
LISTADO DE FIGURAS	xxv
LISTADO DE TABLAS	xxxiii
LISTADO DE ECUACIONES	xxxv
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA	1
1.2. CUESTIÓN A INVESTIGAR	4

1.3. TEMÁTICA DEL COMPENDIO DE PUBLICACIONES	5
2. MARCO DE REFERENCIA	7
2.1. OPTIMIZACIÓN DEL EMBALAJE DE PROTECCIÓN	7
2.2. OPTIMIZACIÓN DEL EMBALAJE DE PROTECCIÓN	9
2.3. VIBRACIONES EN VEHÍCULOS	11
2.4. SÍNTESIS EN LABORATORIO DE VIBRACIONES EN VEHÍCULOS	16
2.5. SÍNTESIS EN LABORATORIO DE VIBRACIONES EN VEHÍCULOS UTILIZANDO FUNCIONES ESPECTRALES PREDETERMINADAS	17
2.6. SÍNTESIS EN LABORATORIO DE VIBRACIONES EN VEHÍCULOS UTILIZANDO FUNCIONES ESPECTRALES MEDIDAS	22
2.7. RECIENTES TÉCNICAS DE ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE VIBRACIONES	26
2.8. CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES ESTADÍSTICAS DE PROCESOS ALEATORIOS A TRAVÉS DE MODELOS ESTADÍSTICOS	27
2.9. IMPACTOS EN EL PROCESO DE DISTRIBUCIÓN	29
3. OBJETIVOS	33
4. HIPÓTESIS	35
4.1. FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS	35
4.2. DEFINICIÓN DE LAS HIPÓTESIS	38
5. MATERIALES Y MÉTODOS	47
5.1. ARTÍCULO 1. Medida y análisis del entorno de distribución aéreo de mercancías enviadas mediante DHL y FedEx entre Europa y USA	49
5.2. ARTÍCULO 2. Medida y análisis de los niveles de vibración que se transmite a la mercancía en el transporte por carretera en España en función de la carga, el tipo de suspensión y la velocidad del vehículo	52

5.3. ARTÍCULO 3. Interpretando los datos de impactos para la estimación de los niveles de altura de caída durante el entorno de distribución	58
5.4. ARTÍCULO 4. Monitorizando la evolución de la fatiga en embalajes de cartón ondulado sometidos a cargas dinámicas de compresión aleatorias	65
5.5. ARTÍCULO 5. Nuevo modelo de distribución estadística de las vibraciones aleatorias generadas por vehículos en carretera	71
5.6. ARTÍCULO 6. Efecto de la compresión inicial en material de amortiguamiento de cartón ondulado en las características de atenuación ante repetitivos impactos	78
6. RESUMEN DE LAS PUBLICACIONES	81
6.1. ARTÍCULO 1. Medida y análisis del entorno de distribución aéreo de mercancías enviadas mediante DHL y FedEx entre Europa y USA	82
6.2. ARTÍCULO 2. Medida y análisis de los niveles de vibración que se transmite a la mercancía en el transporte por carretera en España en función de la carga, el tipo de suspensión y la velocidad del vehículo	83
6.3. ARTÍCULO 3. Interpretando los datos de impactos para la estimación de los niveles de altura de caída durante el entorno de distribución	84
6.4. ARTÍCULO 4. Monitorizando la evolución de la fatiga en embalajes de cartón ondulado sometidos a cargas dinámicas de compresión aleatorias	85
6.5. ARTÍCULO 5. Nuevo modelo de distribución estadística de las vibraciones aleatorias generadas por vehículos en carretera	86
6.6. ARTÍCULO 6. Efecto de la compresión inicial en material de amortiguamiento de cartón ondulado en las características de atenuación ante repetitivos impactos	87
7. RESULTADOS	89
7.1. ARTÍCULO 1. Medida y análisis del entorno de distribución aéreo de mercancías enviadas mediante DHL y FedEx entre Europa y USA	89
7.2. ARTÍCULO 2. Medida y análisis de los niveles de vibración	

que se transmite a la mercancía en el transporte por carretera en España en función de la carga, el tipo de suspensión y la velocidad del vehículo	92
7.3. ARTÍCULO 3. Interpretando los datos de impactos para la estimación de los niveles de altura de caída durante el entorno de distribución	102
7.4. ARTÍCULO 4. Monitorizando la evolución de la fatiga en embalajes de cartón ondulado sometidos a cargas dinámicas de compresión aleatorias	104
7.5. ARTÍCULO 5. Nuevo modelo de distribución estadística de las vibraciones aleatorias generadas por vehículos en carretera	108
7.6. ARTÍCULO 6. Efecto de la compresión inicial en material de amortiguamiento de cartón ondulado en las características de atenuación ante repetitivos impactos	131
8. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	137
8.1. DISCUSIÓN	137
8.2. CONCLUSIONES	141
9. DESARROLLOS FUTUROS	151
10. REFERENCIAS	155
ANEXO	163
PUBLICACIÓN N° 1. Measurement and analysis of international air parcel shipping environment for DHL and FedEx between Europe and United States	164
PUBLICACIÓN N° 2. Measurement and analysis of vibration levels for truck transport in Spain as a function of payload, suspension and speed	174
PUBLICACIÓN N° 3. Interpreting shock data to estimate drop height levels during handling	188
PUBLICACIÓN N° 4. Monitoring the Evolution of Fatigue in Corrugated Paperboard under Random Loads	197
PUBLICACIÓN N° 5. A model for the statistical distribution of road vehicle vibrations	204

**PUBLICACIÓN N° 6. Effect of initial precompression of corrugated  
paperboard cushions on shock attenuation characteristics in  
repetitive impacts**\_\_\_\_\_211



## SÍMBOLOS UTILIZADOS

---

- a** \_\_\_\_\_ Pulso aceleración-tiempo
- $a_{i,t}$**  \_\_\_\_\_ Aceleración registrada en “g” para cada evento o registro determinado “i” en el tiempo “t”
- $av(g)$**  \_\_\_\_\_ Aceleración media en un pulso aceleración-tiempo
- ASTM** \_\_\_\_\_ American Society for Testing and Materials
- B2B** \_\_\_\_\_ Business-to-business
- B2C** \_\_\_\_\_ Business-to-consumer
- c** \_\_\_\_\_ Coeficiente de calibración
- CDF** \_\_\_\_\_ Función de distribución acumulada
- e** \_\_\_\_\_ Coeficiente de restitución entre el embalaje y la superficie de impacto
- EDH** \_\_\_\_\_ Effective drop height
- EDR** \_\_\_\_\_ Environmental data recorder
- $f_n$**  \_\_\_\_\_ Frecuencia natural
- $f_{max}$ ,  $f_d$**  \_\_\_\_\_ Frecuencia en la que se da la máxima transmisibilidad en la FRF

$f_s$	Frecuencia de muestreo
FFT	Transformada rápida de Fourier
FRF	Función de respuesta en frecuencia
G, g	Aceleración de la gravedad
$G_{fi}$	Módulo del espectro de aceleración en “g” asociado con una frecuencia determinada del espectro “f” y un evento o registro determinado “i”
GPS	Global Position System
HP	Hipótesis principales
HT	Hipótesis de trabajo
$I_T$	Intensidad RMS del ensayo
$I_o$	Intensidad RMS original
ISO	International Standards Organization
IST	Instrumented Sensor Technology
ISTA	Internacional Safe Transit Association
K, $K_d$	Rigidez dinámica
$K_s$	Rigidez estática
$K_t$	Kurtosis o coeficiente de curtosis
mdn	Mediana
PEAK(G)	Máxima aceleración instantánea
PSD	Función o gráfico de densidad espectral de potencia
RDH	Real drop height
RMS	Raíz del valor medio al cuadrado
RMS(G)	Nivel de vibración media
RVC	Random vibration controller
SRS	Espectro de respuesta en frecuencia
$T_T$	Duración del ensayo
$T_o$	Duración del proceso de vibración original
$v_i$	Velocidad de impacto en un pulso aceleración-tiempo
$\Delta V$	Cambio total de velocidad en un pulso aceleración-tiempo
$\Delta f$	Resolución del espectro de frecuencia
$\epsilon_p$	Deformación inicial debida a una precompresión
$\mu$	Media

$\nu$  (Sk) \_\_\_\_\_ Skewness o coeficiente de asimetría

$\sigma$  \_\_\_\_\_ Desviación standard

$\zeta$  \_\_\_\_\_ Amortiguamiento general



## LISTADO DE FIGURAS

---

2.1. Concepto de un sistema producto-embalaje óptimo _____	10
2.2. Función de coste para la optimización del sistema producto-embalaje _____	11
2.3. Izquierda: Espectro RMS , Derecha: PSD envolvente utilizado en el método Scandia (Reproducido de Richards, 1990) _____	14
2.4. Variaciones en amplitud de vibración RMS (ventana de 5 segundos) en función de la velocidad del vehículo (Reproducido de Richards, 1990) _____	15
2.5. Ilustración de la naturaleza no-Gaussiana de las vibraciones en vehículos (Reproducido de Charles, 1993) _____	15
2.6. Esquema básico de un simulador de vibraciones para ensayos de embalajes (Reproducida de Rouillard y Sek, 2003) _____	17
2.7. Especificaciones para la simulación aleatoria de vibraciones verticales en el transporte (Reproducida de Mil-Std-810E, 1989 – Notas originales) _____	18
2.8. Especificaciones para la simulación aleatoria de vibraciones verticales en general para vehículos de carretera (Reproducida de ISO 13355, 2001) _____	19

2.9. Especificaciones para la simulación aleatoria de vibraciones verticales para varias suspensiones, cargas y tipos de vehículos de carretera (Reproducida de ASTM D4728, 2001)	20
2.10. Especificaciones para la simulación aleatoria general de vibraciones verticales para camiones con varios niveles de seguridad de ensayo (Reproducida de ASTM D4728, 2001 y D4169, 2001)	20
2.11. Vibraciones verticales sintetizadas de una fuente espectral individual y promediada con varios tipos de vehículos y cargas. Arriba: PSDs. Abajo: Vibraciones sintetizadas (Reproducida de Rouillard y Sek, 2003)	23
2.12. Vibraciones “Gaussian” sintetizadas de una PSD promedio correspondiente a una fuente de vibración no-estacionaria (Reproducida de Rouillard y Sek, 2001)	24
2.13. PDF de vibraciones medidas no-estacionarias (izquierda) comparada a la PDF de vibraciones simuladas (derecha) ambas dibujadas con el mejor ajuste de una distribución “Gaussian” (Reproducida de Rouillard y Sek, 2001)	25
2.14. Ilustración para la modulación y segmentación del nivel RMS de una función de densidad de probabilidad para simulación	27
2.15. Ilustración del proceso de distribución por empresas de paquetería	30
5.1. Embalajes de ensayo	49
5.2. Embalajes de ensayo con etiquetas de aviso de fragilidad	50
5.3. Ejemplo de pulso registrado en el proceso de distribución	51
5.4. Izq.: Trailer con suspensión neumática. Der.: Trailer con suspensión mecánica	52
5.5. Instalación de los registradores de vibraciones y del GPS+GSM	53
5.6. Ruta de los trayectos 1 y 2	55
5.7. Ruta de los trayectos 3 y 4	56
5.8. Equipamiento utilizado	58
5.9. Método de cálculo de la RDH	59
5.10. Cálculo de los parámetros característicos del pulso de choque	60
5.11. Definición de los métodos de cálculo de la EDH	61
5.12. Definición de los errores en el cálculo de la EDH	62
5.13. Aceleración versus velocidad de impacto producido en una caída libre	63

5.14. Algoritmo para la calibración de la EDH	63
5.15. Algoritmo para el cálculo de los errores	64
5.16. Esquema ejemplo de hipótesis a contrastar en este artículo	65
5.17. Modelo de un sistema de un grado de libertad	65
5.18. Técnica de extracción de parámetros modales y cálculo de la rigidez dinámica	67
5.19. Preparación de los ensayos exploratorios iniciales	68
5.20. Preparación de los ensayos exploratorios iniciales	69
5.21. Ejemplo de una FRF analizada con ajuste de mínimos cuadrados	69
5.22. Preparación de los ensayos finales	70
5.23. Ejemplo de señal temporal y de la función RMS desplazada de un registro	73
5.24. Algoritmo para la optimización del ajuste	76
5.25. Esquema del experimento y metodología empleada	77
7.1. Función de distribución acumulada de las alturas de caída esperadas	91
7.2. Porcentaje de caídas según la orientación del impacto	91
7.3. CDF del nivel de vibración RMS(G) para cada intervalo de velocidad	92
7.4. CDF del nivel máximo de aceleración para cada intervalo de velocidad	92
7.5. CDF del factor de cresta para cada intervalo de velocidad	93
7.6. Nivel vibración RMS(G) versus carga y tipo de suspensión del vehículo	93
7.7. Nivel aceleración máxima versus carga y tipo de suspensión del vehículo	94
7.8. Factor de cresta versus carga y tipo de suspensión del vehículo	94
7.9. PSD versus velocidad para trailer con suspensión neumática vacío	95
7.10. PSD versus velocidad para trailer con suspensión neumática (21000 kg)	95
7.11. PSD versus velocidad para trailer con suspensión de ballesta vacío	96
7.12. PSD versus velocidad para trailer con suspensión de ballesta (3000 kg)	96
7.13. PSD de trailer con suspensión neumática vacío versus porcentaje de eventos promediados de la CDF	97
7.14. PSD de trailer con suspensión neumática (21000 kg) versus porcentaje de eventos promediados de la CDF	97
7.15. PSD de trailer con suspensión de ballesta vacío versus porcentaje de eventos promediados de la CDF	98
7.16. PSD de trailer con suspensión de ballesta (3000 kg) versus porcentaje de eventos promediados de la CDF	98

7.17. Función PSD escalable para trailer con suspensión neumática versus carga	99
7.18. Factor de escala de la función PSD escalable para trailer con suspensión neumática versus carga	99
7.19. Factor de escala de la función PSD escalable para trailer con suspensión de ballesta versus carga	100
7.20. Factor de escala de la función PSD escalable para trailer con suspensión de ballesta versus carga	100
7.21. Errores en la estimación de la EDH versus altura de caída sin tener en cuenta la orientación del impacto en la calibración	102
7.22. Errores en la estimación de la EDH versus altura de caída teniendo en cuenta la orientación del impacto en la calibración	102
7.23. Variación en los coeficientes medios de calibración y/o restitución (c) y (e) para cada método y grupo de orientación de impacto (arista, cara, esquina)	103
7.24. Variación en los errores de las EDH estimadas para cada método	103
7.25. Características de compresión de tres cajas idénticas de cartón ondulado	104
7.26. Evolución de las características de compresión de una misma caja de cartón sometida a sucesivas cargas de compresión	104
7.27. Cambio en la rigidez dinámica y estática relativas por la aplicación de cargas de compresión	105
7.28. Correlación entre la rigidez dinámica y la rigidez estática relativas	105
7.29. Evolución de la función de respuesta en frecuencia (FRF) durante compresión dinámica aleatoria en una caja de cartón ondulado	106
7.30. Evolución de la rigidez dinámica relativa para cajas de cartón ondulado	107
7.31. Evolución del amortiguamiento relativo para cajas de cartón ondulado	107
7.32. Influencia de cada uno de los parámetros del nuevo modelo generalizado en una distribución estadística no-simétrica ( $x_i \neq -\infty$ and $x_i \geq x_0$ )	109
7.33. Influencia de cada uno de los parámetros del nuevo modelo generalizado en una distribución estadística simétrica ( $x_i = -\infty$ )	109
7.34. Influencia de cada uno de los parámetros en la función de densidad de probabilidad del modelo simplificado	113
7.35. Ajuste de la función de densidad de probabilidad del registro-Data-A con el nuevo modelo simplificado y el modelo de tres parámetros de Weibull	114

- 7.36. Ajuste de la función de densidad de probabilidad del registro-Data-B con el nuevo modelo simplificado y el modelo de tres parámetros de Weibull\_\_115
- 7.37. Ajuste de la función de densidad de probabilidad del registro-Data-C con el nuevo modelo simplificado y el modelo de tres parámetros de Weibull\_\_116
- 7.38. Ajuste de la función de densidad de probabilidad del registro-Data-D con el nuevo modelo simplificado y el modelo de tres parámetros de Weibull\_\_117
- 7.39. Ajuste de la función de densidad de probabilidad del registro-Data-E con el nuevo modelo simplificado y el modelo de tres parámetros de Weibull\_\_118
- 7.40. Ajuste de la función de densidad de probabilidad del registro-Data-F con el nuevo modelo simplificado y el modelo de tres parámetros de Weibull\_\_119
- 7.41. Ajuste de la función de densidad de probabilidad del registro-Data-G con el nuevo modelo simplificado y el modelo de tres parámetros de Weibull\_\_120
- 7.42. Ajuste de la función de densidad de probabilidad del registro-Data-H con el nuevo modelo simplificado y el modelo de tres parámetros de Weibull\_\_121
- 7.43. Ajuste de la función de densidad de probabilidad del registro-Data-K con el nuevo modelo simplificado y el modelo de tres parámetros de Weibull\_\_122
- 7.44. Ajuste de la función de densidad de probabilidad del registro-Data-L con el nuevo modelo simplificado y el modelo de tres parámetros de Weibull\_\_123
- 7.45. Ajuste de la función de densidad de probabilidad del registro-Data-M con el nuevo modelo simplificado y el modelo de tres parámetros de Weibull\_\_124
- 7.46. Ajuste de la función de densidad de probabilidad del registro-Data-N con el nuevo modelo simplificado y el modelo de tres parámetros de Weibull\_\_125
- 7.47. Ajuste de la función de densidad de probabilidad del registro-Data-O con el nuevo modelo simplificado y el modelo de tres parámetros de Weibull\_\_126
- 7.48. Bondad de ajuste para el parámetro estadístico “Media” de la función de densidad de probabilidad de los registros analizados aplicando el nuevo modelo simplificado y el de tres parámetros de Weibull\_\_\_\_\_127
- 7.49. Bondad de ajuste para el parámetro estadístico “Mediana” de la función de densidad de probabilidad de los registros analizados aplicando el nuevo modelo simplificado y el de tres parámetros de Weibull\_\_\_\_\_127
- 7.50. Bondad de ajuste para el parámetro estadístico “Desviación estándar” de la función de densidad de probabilidad de los registros analizados aplicando el nuevo modelo simplificado y el de tres parámetros de Weibull\_128

7.51. Bondad de ajuste para el parámetro estadístico “Coeficiente de asimetría o Skewness” de la función de densidad de probabilidad de los registros analizados aplicando el nuevo modelo simplificado y el de tres parámetros de Weibull_____	128
7.52. Bondad de ajuste para el parámetro estadístico “Coeficiente de curtosis o Kurtosis” de la función de densidad de probabilidad de los registros analizados aplicando el nuevo modelo simplificado y el de tres parámetros de Weibull_____	129
7.53. Relación de independencia entre los parámetros del nuevo modelo simplificado_____	129
7.54. Funciones de densidad de probabilidad de los 13 registros ajustadas con el nuevo modelo simplificado y normalizadas en ambos ejes_____	130
7.55. Efecto de la deformación inicial, $\epsilon_p$ , en las características de compresión (velocidad de compresión de 250 mm/s) en material de amortiguamiento Corrupad®_____	131
7.56. Curvas de amortiguamiento obtenidas mediante el método de Sek (2000) y tensión estática adoptada para los ensayos de impacto_____	131
7.57. Efecto de los 20 impactos sucesivos de la primera serie sobre una muestra de Corrupad® con una deformación inicial de $\epsilon_p = 50\%$ _____	132
7.58. Efecto de los 20 impactos sucesivos de la primera serie sobre una muestra de Corrupad® con una deformación inicial de $\epsilon_p = 65\%$ _____	132
7.59. Efecto de los 20 impactos sucesivos de la primera serie sobre una muestra de Corrupad® con una deformación inicial de $\epsilon_p = 80\%$ _____	133
7.60. Efecto de los 20 impactos sucesivos de la primera serie sobre una muestra de Corrupad® con una deformación inicial de $\epsilon_p = 95\%$ _____	133
7.61. Efecto de los 15 impactos sucesivos de la segunda serie sobre una muestra de Corrupad® con una deformación inicial de $\epsilon_p = 50\%$ _____	134
7.62. Efecto de los 15 impactos sucesivos de la segunda serie sobre una muestra de Corrupad® con una deformación inicial de $\epsilon_p = 65\%$ _____	134
7.63. Efecto de los 15 impactos sucesivos de la segunda serie sobre una muestra de Corrupad® con una deformación inicial de $\epsilon_p = 80\%$ _____	135

- 7.64. Efecto de los 15 impactos sucesivos de la segunda serie sobre una muestra de Corrupad® con una deformación inicial de  $\varepsilon_p = 95 \%$  \_\_\_\_\_ 135
- 7.65. Variación de la máxima aceleración tras impactos consecutivos versus deformación inicial,  $\varepsilon_p$ , aplicada a la muestra de Corrupad® \_\_\_\_\_ 136



## LISTADO DE TABLAS

---

5.1. Características de los 13 registros de vibración obtenidos	75
7.1. Altura de caída medida mayor de 76 mm	90
7.2. Altura de caída en orden descendente	90
7.3. Orientación del impacto	90
7.4. Coeficientes medios de calibración y/o restitución (c) y (e) para cada método y grupo de orientación de impacto (arista, cara, esquina)	101
7.5. Errores medios y máximos de las EDH estimadas para cada método	101
7.6. Errores medios de las EDH estimadas para cada grupo de alturas de caída y métodos	101
7.7. Valores de los parámetros del nuevo modelo para distribuciones conocidas	108
7.8. Valores de los parámetros del modelo simplificado para distribuciones conocidas ( $x_i = x_0$ )	113



## LISTADO DE ECUACIONES

---

2.1. Relación entre la duración del ensayo de vibración y la distancia equivalente recorrida para ensayos acelerados_____	21
5.1. Definición de la EDH-Effective Drop Height_____	50
5.2. Función promedio PSD de eventos seleccionados_____	56
5.3. Módulo del espectro de aceleración asociado a una frecuencia y un evento__	57
5.4. Cálculo de la EDH de un registro producido por una caída o impacto_____	60
5.5. Cálculo de la RMS desplazada de un registro vibratorio_____	71
5.6. Distribución estadística de tres parámetros de Weibull_____	72
5.7. Función de densidad de probabilidad de una variable $x$ , con el nuevo modelo desarrollado_____	72
5.8. Función gamma completa_____	73
5.9. Función gamma incompleta superior_____	73
5.10. Nuevo modelo simplificado para caracterizar la distribución de densidad de probabilidad de la RMS desplazada de vibraciones producidas por vehículos en carretera_____	73

5.11. Parámetro estadístico, media, del nuevo modelo simplificado, para el caso de las vibraciones producidas por vehículos en carretera	74
5.12. Parámetro estadístico, mediana, del nuevo modelo simplificado, para el caso de las vibraciones producidas por vehículos en carretera	74
5.13. Parámetro estadístico, desviación estándar, del nuevo modelo simplificado, para el caso de las vibraciones producidas por vehículos en carretera	74
5.14. Parámetro estadístico, skewness, del nuevo modelo simplificado, para el caso de las vibraciones producidas por vehículos en carretera	74
5.15. Parámetro estadístico, kurtosis, del nuevo modelo simplificado, para el caso de las vibraciones producidas por vehículos en carretera	74
5.16. Función de transferencia de un sistema lineal de segundo orden	78
5.17. Aceleración máxima transmitida por el material de amortiguamiento tras sucesivos impactos	79
7.1. Función de densidad de probabilidad del nuevo modelo generalizado desarrollado para procesos aleatorios	108
7.2. Momentos centrales del nuevo modelo generalizado desarrollado para procesos aleatorios	110
7.3. Parámetro estadístico “Media” del nuevo modelo generalizado desarrollado para procesos aleatorios	110
7.4. Parámetro estadístico “Mediana” del nuevo modelo generalizado desarrollado para procesos aleatorios	111
7.5. Parámetro estadístico “Varianza” del nuevo modelo generalizado desarrollado para procesos aleatorios	111
7.6. Parámetro estadístico “Coeficiente de asimetría o Skewness” del nuevo modelo generalizado desarrollado para procesos aleatorios	111
7.7. Parámetro estadístico “Coeficiente de curtosis o Kurtosis” del nuevo modelo generalizado desarrollado para procesos aleatorios	112
7.8. Función de probabilidad acumulada del nuevo modelo generalizado desarrollado para procesos aleatorios	112
7.9. Función de densidad de probabilidad simplificada para procesos vibratorios de vehículos en carretera	113

# 1

## INTRODUCCIÓN

---

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

El daño que reciben los productos de consumo a lo largo de la cadena de distribución es muy elevado. El producto y su embalaje durante este proceso se encontrarán con riesgos como compresiones, vibraciones, humedad, electricidad estática, calor, frío, cambios de presión, impactos por caídas e inestabilidad. El producto o su embalaje deberá ser capaz de soportar sin sufrir daño alguno todo este abuso. Por lo tanto, si se conocen y controlan con precisión los riesgos existentes en el entorno de la distribución, se podrá conseguir una optimización del embalaje de protección.

Las solicitaciones a las que los productos se ven sometidos durante su ciclo de distribución son muy complejas dado que generalmente son combinaciones de solicitaciones de comportamiento y reacción diferente por parte del producto y su embalaje que lo protege. Actualmente las empresas fabricantes de productos y usuarias de embalajes no aplican métodos para el desarrollo eficiente del embalaje de protección, y aquellas pocas que lo hacen aplican métodos que simplifican la realidad y que en

vez de ayudar a la protección del producto, en ocasiones, son contraproducentes por incrementar el nivel de daño del mismo. Otras empresas utilizan normas obsoletas para comprobar que su producto-embalaje cumple con ellas y creer que con ello el embalaje va a cumplir su función de una forma óptima y eficaz.

Es importante que seamos conscientes del impacto que tiene el embalaje en el costo final de un producto y la repercusión que este costo puede llegar a tener en la producción de una empresa. Como dato aproximado, el gasto de las empresas en materiales de envase y embalaje para sus productos incluyendo paletas de embarque de un solo uso suele alcanzar más de 100 billones de euros al año, en este estimado se incluyen a todas las industrias (sectores) siendo las de alimentos y bebidas las que mas gastos de este tipo presentan debido a la gran cantidad de embarques y el volumen de los mismos. Todas las industrias comparten además otro coste que es el referido al daño de los productos. Se estima que aproximadamente los reclamos 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 proviene de reclamaciones no pagadas por los transportistas y de los costes de procesos de las reclamaciones por ambas partes, principalmente.

Cuando hablamos de eficiencia y optimización nos referimos a la reducción de la cantidad de material de embalaje y amortiguamiento a utilizar necesario para proteger al producto en el proceso de distribución y a la reducción consiguiente también del coste de reclamaciones por daños. Según datos proporcionados por las compañías aseguradoras, el 75% de las pérdidas por daños en productos provocados por un deficiente embalaje, podría evitarse; de la misma forma que también podría reducirse el sobre-coste innecesario consecuencia de envases sobredimensionados. Para ello, cada sistema de embalaje debe estar diseñado específicamente para con su contenido y haber superado satisfactoriamente toda una serie de pruebas en la que se simulen las distintas sollicitaciones ambientales a las que estará expuesto a lo largo de su ciclo de distribución (impactos, vibraciones, compresiones,...).

Actualmente existe la tendencia en el mercado de integrar operadores logísticos encargados de realizar la gestión correspondiente al ciclo de distribución del producto. La participación de estos operadores logísticos conlleva un aumento del número de procesos de manipulación y de modos de transporte empleados sobre cada unidad de carga. Y es por ello, que todos aquellos aspectos que ya venían afectando a los productos y sus

embalajes a lo largo de su ciclo de distribución (como compresión, choques y vibraciones) se ven seriamente potenciados.

Los requisitos mecánico-estructurales exigidos a los sistema de embalaje utilizados han ido aumentando y endureciéndose notablemente. Es decir, que la principal misión aportada por los embalajes de distribución, de contener y proteger a su contenido frente a posibles agresiones externas, está empezando a cobrar mayor fuerza e interés. Todo ello ligado a la necesidad de conocer de la forma más fehaciente posible cuál va ser el comportamiento del embalaje de un producto de forma previa a la puesta en el mercado del producto, ya que sólo de esta forma se podrá garantizar que se ha alcanzado la misión exigida al embalaje.

En la actualidad, debido al incremento de la compra-venta de productos por catálogo e Internet por parte de los consumidores, uno de los riesgos a los que se enfrentan las empresas es conocer el número de impactos y la altura equivalente de caída, que el sistema unitario embalaje-producto sufre a lo largo de su distribución, la cual se realiza mayoritariamente por empresas de paquetería, donde el medio de distribución predominante es el aéreo y donde las operaciones de manutención en tierra son elevadas, para poder diseñar el embalaje óptimo que necesita el producto para no sufrir daño durante este particular ciclo de distribución.

Otro de los riesgos a los que se enfrentan las empresas es conocer el nivel de vibraciones que los sistemas paletizados embalaje-producto, sufren a lo largo de su distribución desde el lugar donde se fabrican, embalan y paletizan los productos hasta que llegan a los puntos de distribución, la cual se realiza mayoritariamente por carretera.

Los datos que existen hoy en día sobre el número de choques y la altura de caída, que el sistema unitario embalaje-producto sufre a lo largo de su distribución mediante empresas de paquetería, se han centrado únicamente en pequeñas áreas regionales de Estados Unidos y Europa, no pudiendo ser extrapolados a ciclos de distribución internacionales, con lo cual el embalaje de los productos que se diseña actualmente con los datos que se disponen no está optimizado, repercutiendo en costes de exceso-embalaje en unos casos y de daños por defecto-embalaje en otros.

En cuanto al transporte por carretera de los sistemas paletizados embalaje-producto, la inexistencia de estándares de trayectos complica la posibilidad de que un empresa pueda simular el comportamiento de su producto embalado y paletizado para, el desarrollo y optimización de los embalajes

de protección y amortiguación del producto, no pudiendo optimizar el tiempo y los costes de producción frente al lanzamiento al mercado del nuevo producto al no poder ser adecuadamente validado.

No solo la inexistencia de trayectos es uno de los problemas, sino que además los estándares de las normas no se ajustan a la realidad actual y se están utilizando, para la simulación de procesos vibratorios, gráficos de densidad espectral de potencia (PSD) que no simulan de forma correcta el transporte de mercancías por carretera.

Debido a que la validación de un sistema de embalaje mediante el envío del mismo ha demostrado ser poco práctica e inadecuada, la realización de ensayos a sistemas de embalajes en el laboratorio es cada vez más utilizada como herramienta de optimización del embalaje de protección. Los ensayos a sistemas de protección de embalaje, bajo condiciones controladas de laboratorio, generalmente implica la síntesis de las vibraciones que se esperan encontrar durante el transporte.

Las simplificaciones y suposiciones realizadas por los ingenieros de embalaje en las fases de desarrollo de los sistemas de embalajes, con respecto a los niveles y características de los impactos y vibraciones del entorno de distribución, hacen difícil la optimización del embalaje de protección sino se cuenta con una validación experimental.

Los resultados de numerosos estudios de entornos de distribución han sido incorporados en diversas normas utilizadas para determinar programas de ensayo en laboratorio. A veces, estas técnicas de análisis poco sofisticadas y aproximadas fomentan la adopción de un enfoque conservativo para el desarrollo de embalajes, que en muchos de los casos, conduce a un sobre-embalaje.

## **1.2. CUESTIÓN A INVESTIGAR.**

Con esta problemática a mejorar, en el presente trabajo se pretende profundizar en la generación de nuevo conocimiento dentro del campo de la ingeniería del embalaje y mejorar las técnicas actuales de simulación de los riesgos transmitidos al producto y su embalaje en los procesos de transporte y distribución. Así, las cuestiones a investigar son: el nivel y la naturaleza del abuso mecánico aplicado al producto embalado durante el proceso de transporte y distribución (en los cuales los impactos, las vibraciones producidas por el vehículo y las compresiones dinámicas son

los más importantes), la precisión de los métodos de estimación de la altura equivalente a impactos obtenidos en el entorno de distribución, metodologías para simular en el laboratorio el proceso de transporte y distribución de la forma más realista posible y el comportamiento de materiales de amortiguamiento más respetuosos con el medio ambiente ante impactos repetitivos.

Gracias a ITENE (Instituto Tecnológico del Embalaje, Transporte y Logística) y al programa de Alta Especialización en Tecnologías Industriales del IMPIVA en su actuación 1 de mantenimiento de líneas de investigación aplicada, se han realizando periodos de investigación en universidades de USA y AUSTRALIA enfocados a investigar sobre las cuestiones antes mencionadas pertenecientes al área de conocimiento de la Ingeniería del Embalaje, Transporte y Distribución. En total 15 meses de estancia en la School of Packaging (Michigan State University, Michigan, EEUU) y la School of Architectural, Civil and Mechanical (Victoria University, Melbourne, Australia); centros en los que se concentran los principales investigadores en el área del trabajo a realizar.

### **1.3. TEMÁTICA DEL COMPENDIO DE PUBLICACIONES.**

Los trabajos realizados y expuestos en las publicaciones del compendio que se anexa al final del presente documento, se han enfocado a la investigación de la problemática relacionada con la cuestión que se acaba de exponer. Se trata de seis artículos, de los cuales, dos de ellos han sido publicados en la revista “Packaging Technology and Science”, otros dos artículos publicados en “Advances in Experimental Mechanics Vols 7-8”, un quinto artículo publicado en “World Congress on Engineering 2007, Vols 1 and 2” y un sexto artículo enviado y pendiente de ser aceptado en la revista “Packaging Technology and Science”.

El primero de ellos está enfocado en la medida y análisis de los impactos recibidos por productos embalados que son enviados por avión mediante empresas transportistas de paquetería entre Europa y USA, obteniendo datos necesarios para simular en laboratorio las condiciones intercontinentales del transporte de paquetería para el correcto diseño de los embalajes de protección.

El segundo se centra en la obtención y análisis de los niveles de vibración que se transmite a la mercancía en el transporte por carretera en España, permitiendo el desarrollo de métodos más reales de simulación del

transporte por carretera en laboratorio, en función de la carga, el tipo de suspensión y la velocidad del vehículo.

El tercero tiene por objeto establecer el algoritmo que estima del modo más preciso posible la altura de caída equivalente a un impacto registrado por acelerómetros tri-axiales que habitualmente se obtienen en la caracterización de entornos de distribución.

El cuarto está orientado a la obtención de un método mediante el cual se pueda cuantificar la aptitud de un embalaje de cartón ondulado para soportar cargas dinámicas de compresión por largos periodos de tiempo.

El quinto se dirige a la obtención de un nuevo modelo matemático que describa con mayor precisión la distribución estadística de las vibraciones aleatorias generadas por vehículos en carretera y que permita a su vez el desarrollo de ensayos de simulación en laboratorio que incluyan la generación de vibraciones aleatorias de diversos niveles de energía.

Por último, el sexto tiene como finalidad el demostrar que materiales de amortiguamiento desarrollados con cartón ondulado precomprimido o predeformado, son una alternativa factible como protección de los productos ante impactos repetitivos frente a los materiales poliméricos menos respetuosos con el medio ambiente.

# 2

## MARCO DE REFERENCIA

---

### **2.1. EL PAPEL QUE DESEMPEÑA EL EMBALAJE DE PROTECCIÓN.**

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). En la actualidad, al contar con eficientes medios de distribución y embalaje, junto con redes de transporte mejoradas, permite que la fabricación y producción se centralice cerca de las fuentes de materias primas mientras que los productos son transportados hacia los centros de consumo. Estas operaciones a gran escala ofrecen beneficios económicos significativos siempre que los embalajes de protección efectivos “protective packaging”, lo hagan posible para los productos acabados que son transportados a lo largo de grandes distancias hacia los centros de consumo.

Uno de los objetivos importantes del "protective packaging" o "sistemas de amortiguamiento" es proteger o aislar los productos contra niveles excesivos de impactos y vibraciones que pueden ocurrir durante el transporte y distribución. En términos prácticos, el nivel de impactos y vibraciones transmitidos a los productos, se reducen a través de los materiales de amortiguación u otros elementos o dispositivos anti-vibración. El nivel de protección que se requiere viene determinado por la fragilidad del producto (susceptibilidad al daño) y por el nivel de severidad de los riesgos que el producto puede encontrarse durante el transporte y distribución. Puesto que el diseño óptimo del material de amortiguamiento requiere un profundo conocimiento de la fragilidad de los productos y su comportamiento ante choques y vibraciones, se ha de prestar especial atención a los choques y vibraciones a los cuales el producto puede verse sometido.

El diseño de sistemas de amortiguamiento ha estado basado en simplificados modelos y asunciones básicas en cuanto a la naturaleza de los choques y vibraciones generados durante el transporte y la distribución (Sek, 2001). Estos modelos y asunciones básicas han fomentado un enfoque conservador en el diseño de embalajes, el cual, en muchos casos, conduce a un sobre-embalaje (Sek, 2001).

Embalajes de protección deficientes o no efectivos son fácilmente identificados al manifestarse, durante el transporte y las tareas de manutención, 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. En principio los sistemas de amortiguamiento son diseñados para proteger al producto de un esperado y aceptable nivel de abuso mecánico durante el envío. Pero en la práctica, sin embargo, el conocimiento de la intensidad y frecuencia de los daños mecánicos no está siempre disponible.

El nivel y naturaleza del abuso mecánico aplicado al producto durante el transporte y distribución (en los cuales los impactos y vibraciones producidos por el vehículo son los más abundantes) pueden ser clasificados, por un lado como normales y esperados, y por otro como extremos y dañinos. Debido a que los niveles severos de abuso mecánico, sobre todo de aquellos generados por el transporte en vehículos, son impredecibles y ocurren aleatoriamente, es necesario considerarlos como riesgos.

Hasta el momento, en los sectores del embalaje y el transporte, gran parte de la actividad sobre la medida y análisis de impactos y vibraciones en vehículos se ha centrado en la síntesis de laboratorio para la validación y ensayos de los sistemas de amortiguamiento en el embalaje. Los ensayos a embalajes o métodos de validación que actualmente son usados tratan a los riesgos relacionados con el transporte de una forma estadística, implicando que la frecuencia de incidentes es inevitable. La información de los riesgos del entorno se usa no solo para el diseño del embalaje, sino también se utiliza para definir secuencias de ensayos de comportamiento. El ensayo de embalajes en condiciones controladas de laboratorio, en las cuales los riesgos son reproducidos o simulados, son ampliamente considerados los mejores en su campo (Sek, 2001). Los riesgos en tareas de transporte y mantenimiento es el factor menos predecible en el diseño de embalajes. Las aseguradoras generalmente exigen que los embalajes cumplan unos estándares, los cuales en cambio, incorporan niveles significativos de sobre-embalaje para compensar lo impredecible que son los riesgos del entorno de distribución. El problema se incrementa con la desgana de las compañías de transporte para garantizar la limitación de los niveles de riesgos en sus cadenas de distribución, tales como el nivel y su número de impactos y el contenido en frecuencia y su nivel de vibración (Rouillard, 2002). Estos temas fomentan que los ingenieros de embalaje tomen un papel conservador, el cual en muchos casos conduce a un sobre-embalaje.

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 exceso de embalajes y ha sido estimado en 130 billones de euros por año (Oestergaard, 1991). Este coste no aparente incluye aquellos asociados con la eliminación, incremento del tráfico, polución, y deterioro acelerado de las carreteras por un volumen excesivo de mercancías sobre-embaladas. Es por tanto evidente que la reducción del sobre-embalaje pueda conducir a reducciones económicas y sociales significativas.

## **2.2. OPTIMIZACIÓN DEL EMBALAJE DE PROTECCIÓN.**

El método ampliamente más aceptado para el desarrollo de sistemas optimizados producto-embalaje optimizados es el llamado “Método de los seis pasos” (Root, 1997):

1. Analizar los riesgos en la distribución
2. Determinar la resistencia del producto (fragilidad)

3. Rediseñar el producto para mejorar su resistencia
4. Caracterizar el material de amortiguamiento
5. Diseñar el material de amortiguamiento
6. Ensayar y validar el sistema producto-embalaje contra riesgos generados en laboratorio.

Como se muestra en la figura 2.1, el método promueve el concepto de que el sistema producto-embalaje óptimo se caracteriza tanto por la mejora en la resistencia del producto como por la cantidad de material de amortiguamiento mínima necesaria para sobrevivir a los riesgos del entorno de distribución.

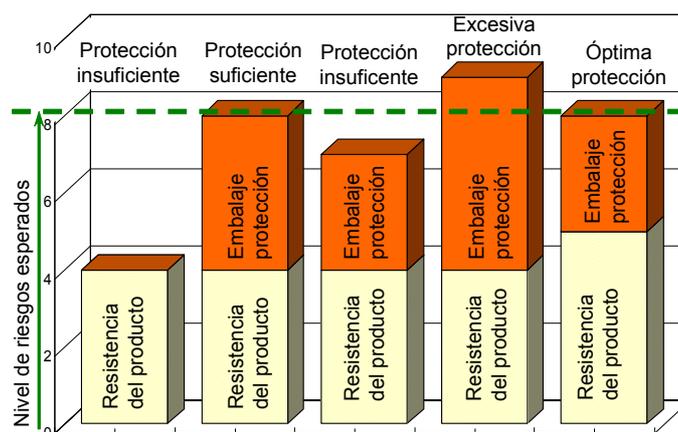


Figura 2.1. Concepto de un sistema producto-embalaje óptimo

El método de los seis pasos se rige por consideraciones económicas que controlan el diseño de productos y embalajes para la distribución y mantenimiento como se muestra en la figura 2.2. 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. Además, 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, como se ilustra en la figura 2.2.

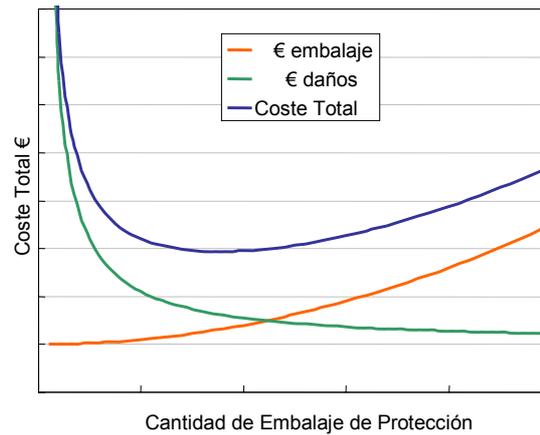


Figura 2.2. Función de coste para la optimización del sistema producto-embalaje

### 2.3. VIBRACIONES EN VEHÍCULOS.

En el entorno de la distribución, los transportes terrestres, y en particular, el transporte por carretera, son la mayor fuente de riesgos de vibración. Estas vibraciones tienen un efecto perjudicial en las mercancías (productos). Los productos sufren daños principalmente por el excesivo nivel de vibración generada por el vehículo. La mayoría de sistemas mecánicos muestran resonancias cuando son sometidos a vibraciones y en lo que respecta a los sistemas de embalaje, las vibraciones durante el transporte pueden llegar a generar considerables respuestas. Godshall (1971) identificó la resonancia de un apilamiento de cajas de cartón ondulado entre valores de 8 y 18 Hz con una transmisibilidad en la resonancia mayor de 6. Productos envueltos en materiales de amortiguamiento mostraron transmisibilidades en vibración de hasta un valor de 10 en la resonancia (Zell, 1969). Estas resonancias pueden provocar elevadas y prolongadas tensiones dinámicas y eventualmente un daño o fallo en el embalaje, el producto o en uno de sus componentes (elementos críticos). Productos electrónicos y fruta/vegetales frescos son dos ejemplos de tipo de mercancía susceptible a daños por vibración. La clase de daño puede abarcar desde abrasión superficial, pérdida de cierres y conectores, pérdida de calibración, fatiga de los metales y apariciones de grietas en componentes plásticos (Caldicott, 1991). La fruta fresca y los vegetales pueden sufrir fatiga en sus paredes celulares a bajos niveles de vibración apareciendo señales o macas (O'Brien, 1963). También, dependiendo de las condiciones del entorno, se observó el colapso prematuro de embalajes de cartón ondulado debido a una excesiva

vibración (Gordon, 1980). Materiales como el vidrio, plásticos duros y algunas clases de metales, fallan principalmente debido a excesivos niveles de tensión. Tensiones por debajo del límite de rotura aplicada repetitivamente tienen efectos insignificantes en la habilidad del material para soportar tensiones. Sin embargo, muchos materiales que son utilizados en productos y embalajes de protección, muestran comportamiento dúctil y se ven afectados por la aplicación repetitiva de esfuerzos de incluso muy baja amplitud. En dichos casos, la habilidad del material para soportar esfuerzos se ve gradualmente erosionada hasta que el fallo ocurre (Kipp, 2000a)

Es evidente que la principal fuente generadora de vibraciones verticales en vehículos por carretera, puede ser atribuida al mal estado de la superficie de las carreteras. Cuando los vehículos con ruedas atraviesan superficies irregulares, la interacción entre el vehículo y el terreno da lugar a un proceso dinámico que produce complejas fuerzas y movimientos dentro del vehículo. Debido a que las irregularidades del pavimento son generalmente aleatorias por naturaleza, las vibraciones resultantes en el vehículo también lo son. Además, los niveles de vibración no son únicamente dependientes de la rugosidad del pavimento, sino que son también función del tipo de vehículo, el nivel de carga y la velocidad del mismo. El efecto de estos parámetros suele hacer difícil, el predecir y caracterizar, las complejas interacciones mecánicas que existen entre el vehículo y la superficie de la carretera. Es por tanto ampliamente conocido que el análisis y simulación de vibraciones en vehículos producidas por las carreteras, exige un alto grado de sofisticación.

Aunque los impactos y vibraciones relativos al transporte ha sido estudiado a fondo en numerosas ocasiones, todavía no existe un método definitivo para predecirlos, analizarlos o simularlos (Ostrem y Godshall, 1979; Kipp, 2000a). Cuanto más importante y significativo es la optimización de los embalajes de protección, el control y entendimiento preciso de los riesgos en el entorno de la distribución se hace mucho más necesario.

La síntesis precisa de vibraciones producidas por vehículos en carretera requiere que el proceso sea profundamente estudiado, y a su vez, cuente con una medida lo más exacta posible. Igualmente, el procedimiento de medida depende de la naturaleza y complejidad del proceso. Aunque las vibraciones verticales en vehículos pueden ser fácilmente medibles, la variabilidad del proceso y la falta de control de los parámetros medidos, hacen difícil, sino imposible, obtener registros que sean típicos de las

vibraciones producidas por vehículos en todas las carreteras. Es necesario llevar a cabo un elevado número de registros de vibraciones, obtenidos bajo diversas condiciones, para obtener estimaciones estadísticas razonables.

Debido a su complejidad, variabilidad e incertidumbre inherente, no existe un método universal para caracterizar vibraciones de vehículos en carretera. Sin embargo, ha habido un número importante de intentos en caracterizar algún aspecto del proceso. Por el momento el enfoque más usual es calcular la función promedio de densidad espectral de potencia (PSD) de las vibraciones. Esta técnica es útil identificando las frecuencias características y la raíz del valor medio (RMS) total del nivel de vibración, y es ampliamente utilizada hoy en día para caracterizar la calidad del trayecto. El mayor inconveniente de la función PSD es que efectivamente describe el nivel de energía media para cada valor de frecuencia del espectro. No contiene información de parámetros que varían con el tiempo, tales como variaciones en amplitud o frecuencia y el tiempo en el cual dichas variaciones se producen. Además, el proceso inherente de promediado temporal que tiene la función PSD no es capaz de separar los efectos de los transitorios que hay dentro de la señal. Esto no tendría consecuencia si el proceso fuera a la vez normal-Gaussian y estacionario. En estos casos la naturaleza de la señal estaría bien definida por la distribución normal y sus momentos estadísticos de alto orden. Sin embargo, las vibraciones de vehículos en carretera son a menudo altamente no-estacionarias principalmente debido a variaciones en la rugosidad de la superficie de rodadura y la velocidad del vehículo. En estos casos la función promedio PSD no describe con precisión el proceso.

Un enfoque que es a veces utilizado para compensar “parcialmente” la no estacionariedad de la amplitud de las vibraciones de vehículos es utilizar el espectro máximo-mantenido. De hecho, en vez de promediar la amplitud de la señal para cada banda estrecha en frecuencia, el espectro máximo-mantenido utiliza la amplitud máxima dentro de cada banda en frecuencia. Generalmente, ante una muestra convenientemente amplia, el espectro máximo-mantenido es una versión amplificada de la función promedio PSD siendo usada a menudo para revelar la relación entre la media y valores máximos espectrales los cuales están relacionados con el factor de cresta. Realmente, la interpretación del espectro máximo-mantenido se hace difícil cuando las vibraciones contienen transitorios. En general, el uso del espectro máximo-mantenido para establecer el nivel de severidad de los ensayos de vibración pueden conducir a resultados conservativos (Richards, 1990). Esto ocurre especialmente si el proceso es altamente no

estacionario y los valores del espectro máximo-mantenido son el resultado de severas excursiones en los niveles de vibración de corta duración. Mientras dichos, estadísticamente poco probables, eventos pueden distorsionar dramáticamente el espectro máximo-mantenido, no tienen prácticamente efecto en la función promedio PSD.

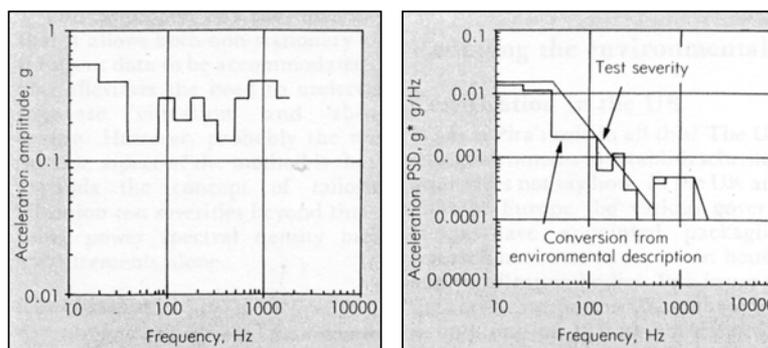


Figura 2.3. Izquierda: Espectro RMS, Derecha: PSD envolvente utilizado en el método Scandia (Reproducido de Richards, 1990)

Otro método cuyo objetivo es el de caracterizar el contenido espectral de vibraciones en vehículos fue desarrollado por Scandia Nacional Laboratorios en Albuquerque (Foley, 1972). Está basado en datos adquiridos durante jornadas reales de transporte en carretera con diversos vehículos, cargas, localización de los sensores y velocidad de los vehículos. El método se basa en evaluar la aceleración RMS dentro de un determinado número de bandas de frecuencia para cada condición. El espectro RMS se convierte en un espectro equivalente PSD, el cual a su vez es usado para generar una función PSD envolvente para usar como función de ensayo. Richards (1990) demostró que este método es particularmente sensible al ancho de banda en frecuencia utilizado para establecer el espectro RMS y que adolece de una falta de claridad en el proceso de generar la función PSD envolvente del espectro equivalente PSD. Un ejemplo del enfoque Scandia se ilustra en la figura 2.3.

La naturaleza no estacionaria de las vibraciones de vehículos en carretera fue investigada por Richards (1990) quien se lo atribuía a las variaciones en la velocidad del vehículo. La figura 2.4 muestra las variaciones en el nivel de aceleración RMS en función de la velocidad del vehículo para un trayecto de 40 minutos. Richards (1990) también identificó que la respuesta dinámica de vehículos en carretera contiene tanto componentes

estacionarias como transitorias y reconoció la dificultad en identificar los transitorios debido a que ocurrían a intervalos aleatorios.

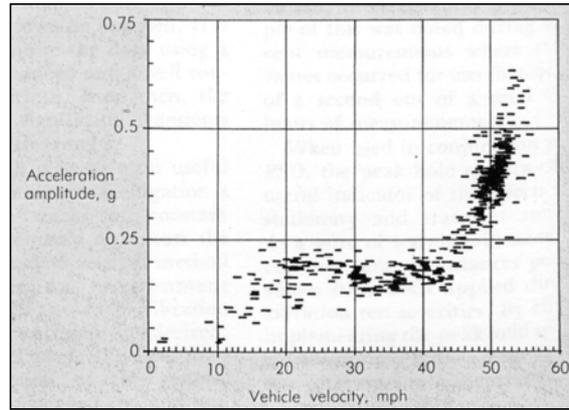


Figura 2.4. Variaciones en amplitud de vibración RMS (ventana de 5 segundos) en función de la velocidad del vehículo (Reproducido de Richards, 1990)

Charles (1993) demostró que la distribución estadística de vibraciones en vehículos contenía grandes valores de amplitud y no se ajustaba a un proceso “Gaussiano” real como se ilustra en la figura 2.5.

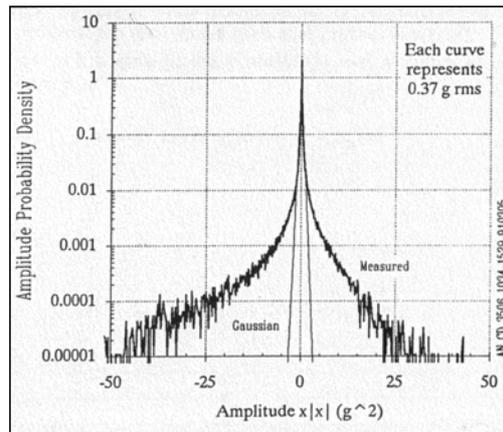


Figura 2.5. Ilustración de la naturaleza no-Gaussiana de las vibraciones en vehículos (Reproducido de Charles, 1993)

## 2.4. SÍNTESIS EN LABORATORIO DE VIBRACIONES EN VEHÍCULOS.

Debido a que la validación de un sistema de embalaje mediante el envío del mismo ha demostrado ser poco práctico e inadecuado, la realización de ensayos a sistemas de embalajes en el laboratorio es cada vez más utilizado como herramienta de optimización del embalaje de protección (Sek, 2001). Los ensayos a sistemas de protección de embalaje, bajo condiciones controladas de laboratorio, generalmente implica la síntesis de las vibraciones que se espera encontrarse durante el transporte. Las simplificaciones y suposiciones, realizadas por los ingenieros de embalaje en las fases de desarrollo de los sistemas de embalajes, con respecto a los niveles y características de los impactos y vibraciones del entorno de distribución, hacen difícil la optimización del embalaje de protección sino se cuenta con una validación experimental. Los resultados de numerosos estudios de entornos de distribución han sido incorporados en diversas normas utilizadas para determinar programas de ensayo en laboratorio. A veces, estas técnicas de análisis poco sofisticadas y aproximadas fomentan la adopción de un enfoque conservativo para el desarrollo de embalajes, que en muchos de los casos, conduce a un sobre-embalaje.

La técnica actual para la simulación en el laboratorio de las vibraciones que se producen durante el transporte es ampliamente adoptada y ha sido utilizada durante muchos años. El método asume que la vibración producida por un vehículo con ruedas puede ser aproximada por un proceso aleatorio normalmente-distribuido “Gaussian” con una media nula. Dichos procesos pueden ser adecuadamente descritos en el dominio de la frecuencia mediante una función promedio de Densidad Espectral de Potencia (PSD). El método hace uso de un controlador de vibración aleatoria (RVC), el cual es un dispositivo diseñado para sintetizar señales aleatorias provenientes de una función PSD y que a su vez controla el movimiento de un actuador o mesa de vibración según las señales aleatorias sintetizadas. Durante la simulación de vibraciones aleatorias de vehículos, la función PSD deseada (también conocida como espectro de vibración) se programa en el RVC, el cual a su vez, sintetiza las vibraciones normalmente distribuidas mediante el computo continuado de la transformada inversa de Fourier de la PSD acoplada con una matriz de fase aleatoria uniformemente distribuida correspondiente a cada componente de Fourier (frecuencia). El movimiento (aceleración) de la mesa de vibración es continuamente monitorizada por el RVC a través de un acelerómetro y las características espectrales de la señal de excitación sintetizada es continuamente ajustada para mantener, en general, el nivel

de vibración y espectro en frecuencia deseados. Un esquema de una configuración típica de simulador de vibraciones aleatorias se muestra en la figura 2.6.

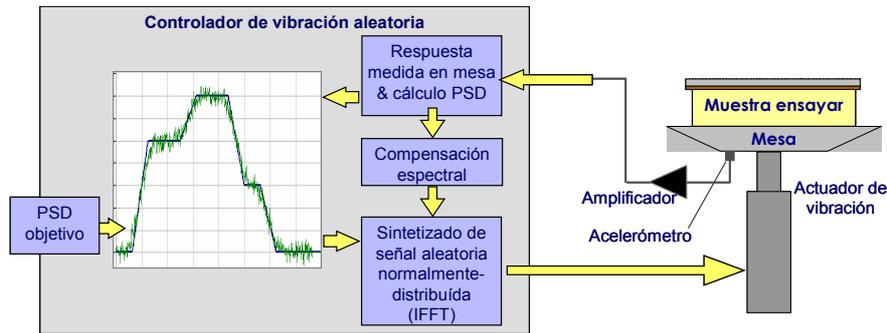


Figura 2.6. Esquema básico de un simulador de vibraciones para ensayos de embalajes (Reproducida de Rouillard y Sek, 2003)

El problema principal de esta técnica está relacionado con la elección de la forma o función a ser utilizada, así como, el nivel de la vibración y duración de la simulación. A continuación se describen diversos modelos y métodos que están actualmente en uso para simular varios tipos de entornos de transporte bajo condiciones controladas.

## 2.5. SÍNTESIS EN LABORATORIO DE VIBRACIONES EN VEHÍCULOS UTILIZANDO FUNCIONES ESPECTRALES PREDETERMINADAS.

Es ampliamente reconocido que la naturaleza y nivel de vibraciones varían drásticamente entre diferentes tipos de vehículos, carga del vehículo, velocidad del vehículo y propiedades del pavimento (Singh y Marcondes 1992; Rouillard y Sek, 2000a). Esto se manifiesta mediante diferencias en las características espectrales, así como, en la variación en los niveles de vibración. En los principios, la medida y análisis de las vibraciones reales producidas por vehículos requerían mucho esfuerzo, y era a menudo económicamente prohibitivo. Esto condujo a la adopción de predeterminados espectros de vibración, los cuales fueron diseñados para aproximar la naturaleza de las vibraciones reales producidas por vehículos durante su desplazamiento. En muchos casos, estos espectros fueron obtenidos de medidas reales llevadas a cabo bajo unas determinadas condiciones y fueron analizadas para producir una media típica que varía significativamente dependiendo de su procedencia.

Kipp (2000b) comparó algunos de los espectros comúnmente utilizados para ensayos que venían en la norma militar Mil-Std-810E “Environmental Test Methods and Engineering Guidelines”, los cuales pretendían representar el entorno de la distribución en general. La función PSD mostrada en la figura 2.7 era acompañada con una recomendación de que 60 minutos de simulación de vibración correspondía a 1600 km de distancia recorrida.

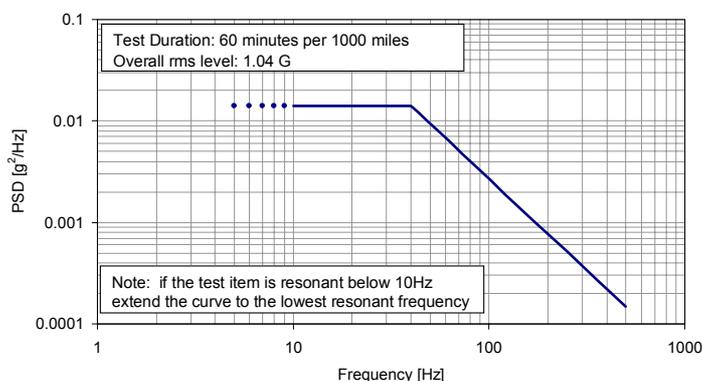


Figura 2.7. Especificaciones para la simulación aleatoria de vibraciones verticales en el transporte (Reproducida de Mil-Std-810E, 1989 – Notas originales)

Tras examinar la figura 2.7, la forma del espectro parece sobre-simplificada y no representa las frecuencias de resonancia de muchos de los vehículos de carretera, las cuales se extienden entre 1 y 8 Hz para las suspensiones y entre 12 y 25 Hz para la respuesta de las ruedas (Kipp, 2000b). Además, la frecuencia límite superior de 500Hz parece excesiva ya que es ampliamente conocido que los vehículos con ruedas raramente producen vibraciones mayores a 200 Hz (Kipp, 2000b). La equivalencia de “1 hora = 1000 millas” es también simplista y no tiene en cuenta las variaciones considerables en las condiciones del pavimento.

Un procedimiento de ensayo ampliamente utilizado es dado por la ISO 13355-2001 “Packaging – Complete, filled transport packages and unit loads – Vertical random vibration test”. La función PSD en este caso, mostrada en la figura 2.8, trata de tener en cuenta la resonancia de vehículos de transporte comerciales con elevadas densidades espectrales de entre 6 y 18 Hz.

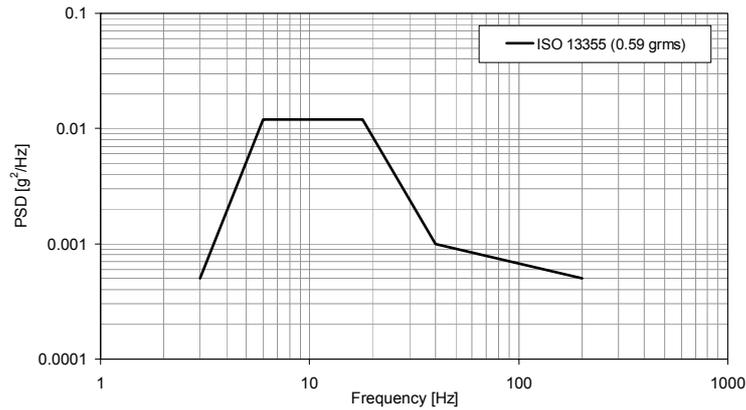


Figura 2.8. especificaciones para la simulación aleatoria de vibraciones verticales en general para vehículos de carretera (Reproducida de ISO 13355, 2001)

Alguna de las funciones espectrales comúnmente más utilizadas para la simulación de vibraciones en el campo de desarrollo de embalajes son aquellas que prescriben la American Society for Testing and Materials (ASTM) norma D4728-01 “Test Method for Random Vibration Testing of Shipping Containers” y norma D4169-01 “Standard Practice for Performance Testing of Shipping Containers and Systems”. La figura 2.9. muestra PSDs para dos clases de vehículos de carretera y condiciones de carga, basadas en datos de vibración medidos a lo largo de un determinado número de clases de vehículos y condiciones (Singh y Marcondes, 1992). Las variaciones en la forma del espectro e intensidad del mismo realzan más los efectos considerables del tipo de suspensión y carga del vehículo en las características espectrales y niveles generales de RMS (Root Mean Square) de las vibraciones verticales.

La figura 2.10, también extraída de la norma D4728-01, representa la PSD general de camiones basada en medias de registros de vibración medidos a lo largo de un determinado número de clases de suspensión, carga, velocidad y superficie de la carretera. La norma afirma que los perfiles PSD de ensayo, figuras 2.9 y 2.10, son proporcionados únicamente con propósito de informar, y no pretenden describir de forma precisa un entorno de transporte o distribución específico y que además los ensayos de vibración aleatoria deberían ser basados en registros de campo representativos. A pesar de esto, las curvas de la figura 2.10 son recomendadas como espectros de ensayo, con intensidad y duración, en la norma ASTM D4169-01. Las especificaciones de las normas ASTM D4728-01 y D4169-01, y en particular el espectro general para camiones

con el nivel de seguridad II, es quizás el comúnmente más utilizado procedimiento de ensayos para validación y desarrollo de embalajes a lo largo de todo el mundo (Kipp, 2000b).

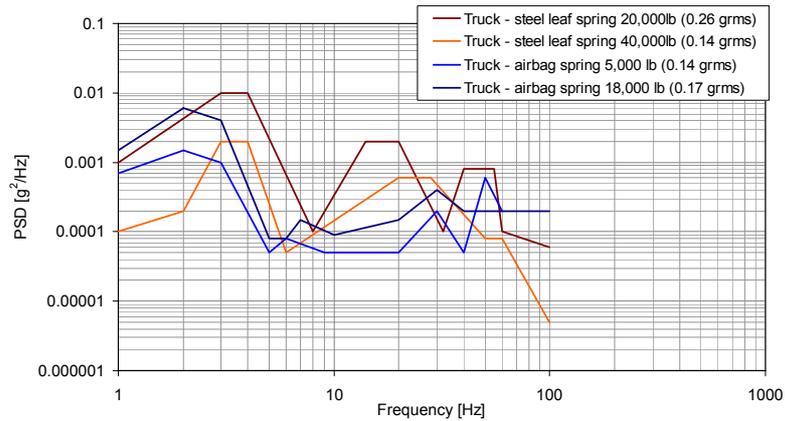


Figura 2.9. Especificaciones para la simulación aleatoria de vibraciones verticales para varias suspensiones, cargas y tipos de vehículos de carretera (Reproducida de ASTM D4728, 2001)

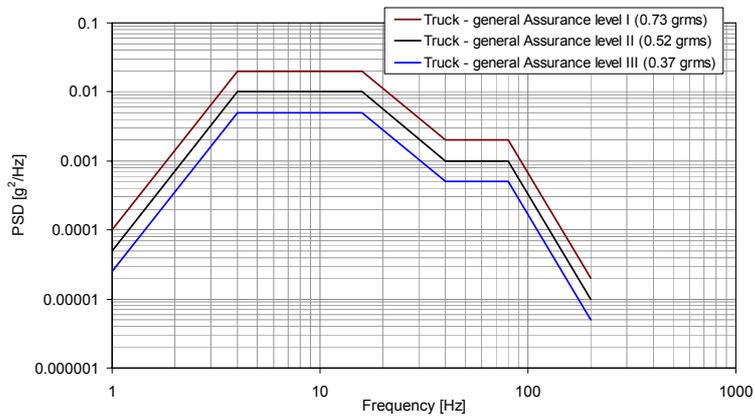


Figura 2.10. Especificaciones para la simulación aleatoria general de vibraciones verticales para camiones con varios niveles de seguridad de ensayo (Reproducida de ASTM D4728, 2001 y D4169, 2001)

Kipp (2000b) trató el tema de la equivalencia definida como la relación entre la duración del ensayo de vibración y la distancia equivalente recorrida. Incluyó la simple aproximación de 1 hora  $\equiv$  100 km basada en una velocidad media del vehículo de 100 km/h y una expresión para ensayos acelerados descrita por la siguiente ecuación:

$$I_T = I_o \sqrt{\frac{T_o}{T_T}} \quad (2.1)$$

donde  $I_T$  e  $I_o$  son la intensidad RMS del ensayo y la intensidad RMS original respectivamente y donde  $T_T$  y  $T_o$  son la duración del ensayo y la duración del proceso de vibración original respectivamente. Esta fórmula se aplica como un factor de multiplicación espectral de tal modo que la forma de la función PSD permanece sin cambios. También recomienda que no se exceda de un ratio de compresión en tiempo de 5:1. También hace una rudimentaria deducción utilizando la fórmula dada en la ecuación 2.1 para demostrar que la función PSD, intensidad y duración dada por el estándar ASTM D4169-01 para ensayos con nivel de seguridad II, representa las vibraciones de trailers con suspensiones mecánicas recorriendo 1200 km a una velocidad media de 100 km/h en una carretera “típica” americana (Kipp, 2000b).

A parte de tener que seleccionar una función PSD de vibración que sea la idónea de entre diversas fuentes, la principal limitación con esta técnica es que los procesos aleatorios de vibración a ser simulados son asumidos normalmente-distribuidos (Gaussian) y estacionarios de ahí que sean caracterizados con la función media PSD la cual también indica un nivel RMS medio. Esto, por descontado, ofrece ventajas significativas en términos de compactación de datos, como también, el de ser compatible con el proceso utilizado para sintetizar señales aleatorias normalmente-distribuidas de una única función espectral que representa la función media PSD del proceso. Sin embargo, las limitaciones de tales técnicas han sido exageradas dado que la falta de información en niveles de vibración requiere el uso de niveles RMS de vibración esperados, los cuales pueden o no, ser representativos de un determinado entorno de distribución. Aunque estos métodos pueden ser aceptables para la validación rudimentaria de embalajes, no son lo suficientemente precisos para ser usados como una herramienta útil para lograr la optimización del los sistemas de embalaje de protección.

## **2.6. SÍNTESIS EN LABORATORIO DE VIBRACIONES EN VEHÍCULOS UTILIZANDO FUNCIONES ESPECTRALES MEDIDAS.**

El concepto que promueve el desarrollo de sistemas de embalaje que protejan contra los riesgos reales durante la distribución, a diferencia de lo más típico o severo representado por las normas, ha estado vigente desde hace tiempo. Por ejemplo, la simulación realística del transporte requiere que el embalaje sea sometido a vibraciones aleatorias que, idealmente, reflejen los riesgos reales del transporte. Los avances tecnológicos han hecho más asequible este enfoque de simulación. Con la llegada en los años 90 de registradores de aceleración más asequibles y fáciles de utilizar, muchos laboratorios comenzaron a caracterizar la naturaleza de las vibraciones en el transporte en ciertos entornos de distribución. Las medidas de campo son utilizadas para calcular la función media PSD y niveles RMS para una amplia variedad de rutas y tipos de vehículos. Estas funciones espectrales obtenidas son procesadas e introducidas manualmente en RVCs o, en los modernos RVCs, importadas directamente. El principal beneficio de este método es que las vibraciones sintetizadas se aproximan mejor a las vibraciones medidas reales. Esto es especialmente importante cuando se considera la reproducción de picos espectrales en relación a resonancias de vibración y daño en productos. El efecto de promediar las vibraciones espectrales obtenidas de varios tipos de vehículos y cargas pueden tener serias consecuencias en la forma del espectro resultante o, más específicamente, en el ancho de la banda espectral en la resonancia. Cuando las fuentes de datos con las que se obtienen las vibraciones contienen resonancias a diferentes frecuencias, cuando estas son promediadas, la relativamente afilada forma del pico espectral presente en cada una de las PSD obtenidas no está presente en la PSD promedio, apareciendo “broad-banded”. Esto tiene un efecto significativo en las vibraciones sintetizadas debido a que la energía de la función promedio PSD se reparte a lo largo de una amplia banda de frecuencia mientras que las PSDs obtenidas individualmente exhiben fuertes resonancias concentradas en una relativamente estrecha banda de frecuencias, tal y como se muestra en la figura 2.11. Otro beneficio

importante es que los datos obtenidos por los dispositivos registradores pueden ser usados para calcular una estimación estadística de los niveles RMS de vibración, los cuales pueden ser usados para variar el nivel de vibración durante la simulación. Aunque la mejora ha sido considerable sobre el método de utilizar funciones PSD genéricas predeterminadas, este enfoque todavía tiene un número significativo de restricciones.

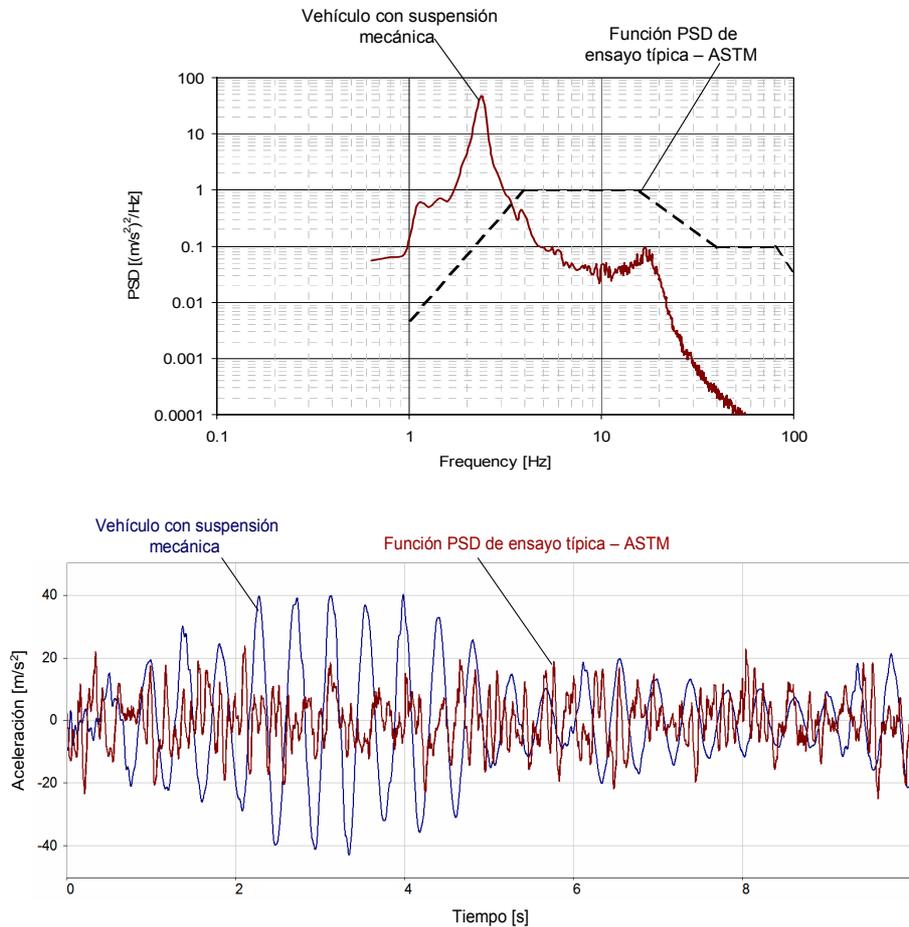


Figura 2.11. Vibraciones verticales sintetizadas de una fuente espectral individual y promediada con varios tipos de vehículos y cargas. Arriba: PSDs. Abajo: Vibraciones sintetizadas (Reproducida de Rouillard y Sek, 2003)

Las principales limitaciones de los dispositivos registradores utilizados hoy en día son las impuestas por la tecnología actual (poca memoria de almacenamiento, baja duración de la batería, localización y velocidad del vehículo no siempre disponibles,...). Estas limitaciones restringen la

posibilidad de capturar una muestra estadística que sea realmente representativa de todo el registro de vibración obtenido. La reducción del precio de estos dispositivos, unido a su uso indiscriminado y a los complicados y poco universales principios que encierran la interpretación de vibraciones aleatorias, conduce a una mala interpretación de los resultados obtenidos. Un buen ejemplo de esto es el uso de una función promediada PSD para describir y simular aquello que obviamente son vibraciones no-estacionarias tal y como se muestra en la figura 2.12. Si no se verifica la “estacionaridad”, el uso de PSDs promediadas para simulación puede conducir a diferencias significativas entre los niveles de vibración reales y los simulados. Como se muestra en la figura 2.12, los niveles de vibración respecto del registro original obtenido en un camión cargado, varían significativamente con un máximo en niveles de aceleración que sobrepasan los 5 G. Además, la función de densidad de probabilidad (PDF) de la señal medida, mostrada en la figura 2.13, muestra que el proceso es también significativamente no-Gaussian. Las vibraciones simuladas, reproducidas de la función PSD promedio de la misma señal, exhibe características propias de una distribución Gaussian (figura 2.13) con niveles de aceleración inferiores a 2.5 G (la mitad del nivel real de vibraciones de la señal original)

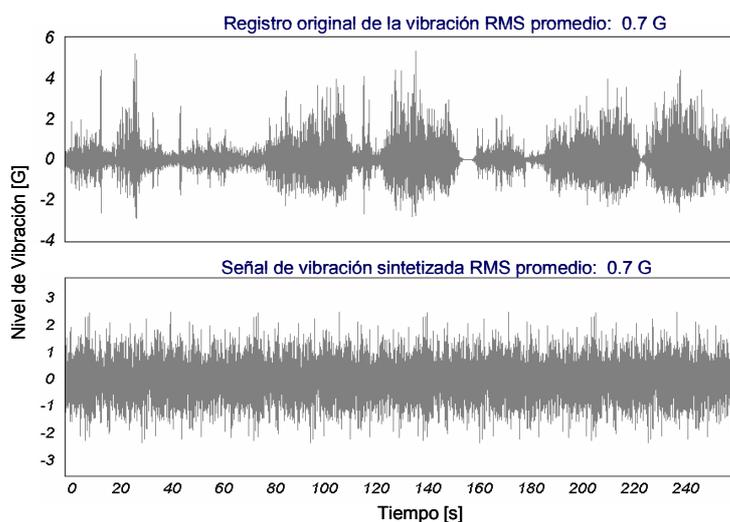


Figura 2.12. Vibraciones “Gaussian” sintetizadas de una PSD promedio correspondiente a una fuente de vibración no-estacionaria (Reproducida de Rouillard y Sek, 2001)

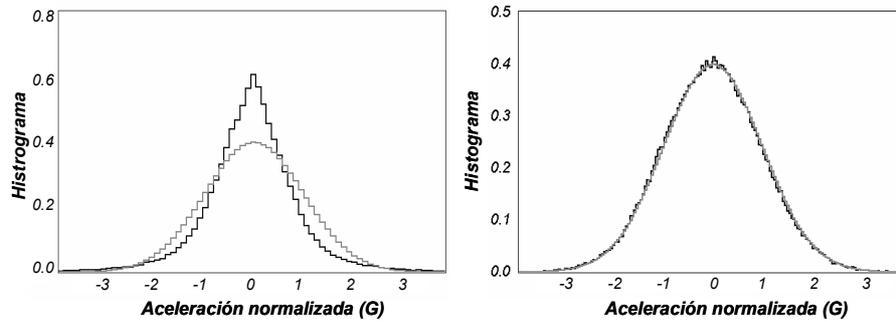


Figura 2.13. PDF de vibraciones medidas no-estacionarias (izquierda) comparada a la PDF de vibraciones simuladas (derecha) ambas dibujadas con el mejor ajuste de una distribución “Gaussian” (Reproducida de Rouillard y Sek, 2001)

A pesar de esto, la función PSD promedio se continúa usando ampliamente, y se seguirá usando durante un tiempo para caracterizar y sintetizar las vibraciones relacionadas con el transporte en el laboratorio para evaluar el comportamiento de los sistemas de embalajes. Prueba de ello son los estudios y mediciones realizadas en los últimos años en diversas zonas del planeta, incluyendo:

- América del Norte (Pierce et al., 1992; Singh et al., 2006; Singh et al., 1992b; Singh et al., 1995)
- China (Singh et al., 2006; Yuan et al., 2006)
- India (Singh et al., 2006; Sandhu et al., 2006)
- Sur-este Asiático (Singh et al., 2006; Chonhenchob et al., 2006; Jarimopas et al., 2005)
- América Del Sur (Rossi y Takayama, 2004)

Los estudios de Norte América mostraron que las suspensiones neumáticas tenían mejor comportamiento y menor nivel de vibración que las de ballestas o mecánicas. Que los niveles de vibración de las suspensiones mecánicas eran mayores del 50% que las provocadas por suspensiones neumáticas. Los niveles de vibración lateral y longitudinal eran extremadamente menores en comparación con las vibraciones verticales. Los mayores niveles de vibración en suspensiones mecánicas se producían a los 4 Hz en la dirección vertical. En los estudios de China y el Sur-este Asiático se demostró que los niveles de vibración producidos en ambas zonas geográficas eran similares a los producidos en Norte América. En América del Sur, concretamente en Bolivia, se realizó un

estudio para medir y analizar el entorno de distribución por carretera a lo largo de 1225 km, llegando a observarse impactos de hasta 12 G en la dirección vertical. Además, los niveles de aceleración fueron mayores a los niveles de las normas ASTM entre los 2 y 10 Hz.

## **2.7. RECIENTES TÉCNICAS DE ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE VIBRACIONES.**

Charles (1993) fue uno de los primeros en abordar el problema de la “no-estacionaridad” con respecto a la simulación. Propuso que los procesos aleatorios no-estacionarios y no-Gaussian podían ser caracterizados por una secuencia ponderada de procesos “Gaussian” independientes, de diferente desviación estándar. Intentos más recientes, (Steinwolf y Connon, 2005; Van Baren, 2005; Smallwood, 2005) han abordado el problema de la no-Gaussian aplicando una transformación no-lineal sobre una función “Gaussian” mediante el polinomio “Hermite”, el cual permite el control de los parámetros tales como la “skewness” y la “kurtosis” de la distribución. Debido a que la causa de la naturaleza “leptokúrtica” (kurtosis mayor que cero) es la “no-estacionaridad” de las vibraciones producidas en el transporte por carretera, más que el inherente carácter no-Gaussian, no consigue reproducir las variaciones en amplitud del proceso que son consideradas esenciales si se quiere realizar simulaciones cuasi-realísticas.

Rouillard y Sek (2000a) propusieron una técnica de simulación que reproduce tales variaciones de amplitud del proceso siempre que se conozca la distribución de la raíz del valor medio al cuadrado (RMS) de la señal de vibración. En la figura 2.14 se muestra un ejemplo del método inicial propuesto en el año 2000 por Rouillard y Sek, en el cual se observa la producción de una señal aleatoria modulada que es similar en carácter a una modulación natural de vibraciones en vehículos no-estacionaria.

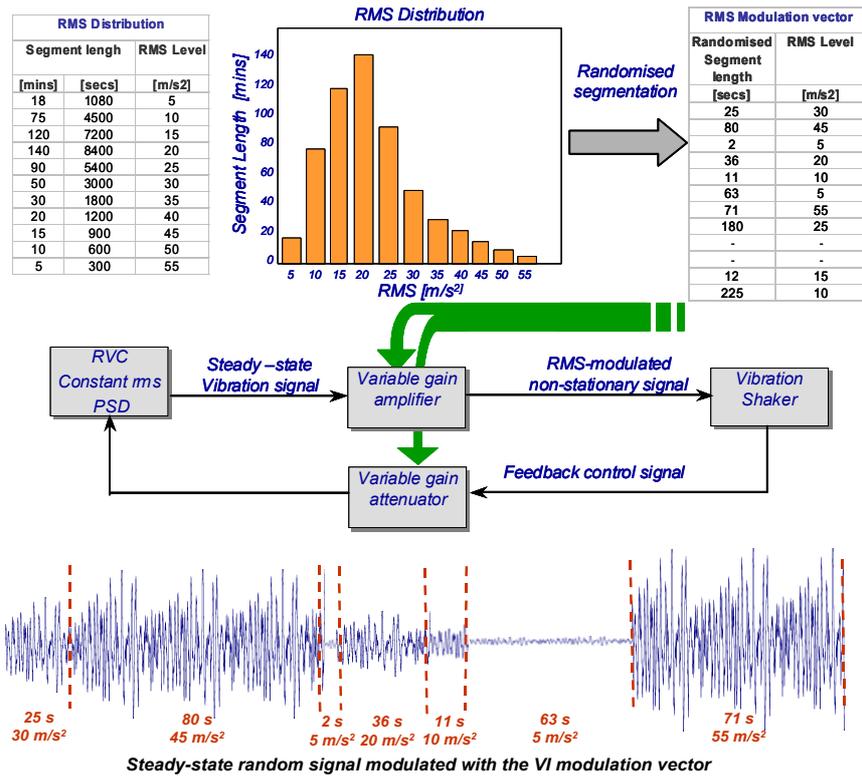


Figura 2.14. Ilustración para la modulación y segmentación del nivel RMS de una función de densidad de probabilidad para simulación

## 2.8. CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES ESTADÍSTICAS DE PROCESOS ALEATORIOS A TRAVÉS DE MODELOS ESTADÍSTICOS.

Uno de los muchos caminos para describir las características estadísticas de los procesos aleatorios es mediante la determinación de su función de densidad de probabilidad. En algunos casos, la distribución estadística relacionada con la energía (o cuadrado de la media) o magnitud del proceso, es más relevante especialmente cuando el proceso exhibe algún nivel de no-estacionaridad. Esto puede ser aplicado a procesos tales como las alturas de las olas en los océanos, la amplitud de los perfiles de las carreteras o la magnitud de las vibraciones generadas por vehículos con ruedas trasladándose por superficies irregulares.

Rice (1944) demostró que la distribución de las zero-up-crossing alturas de olas en un proceso aleatorio normal. Estacionario y ergódico seguía la distribución de Rayleigh. Longuet-Higgins (1952) demostraron que este es el caso para las alturas de las olas en el océano de banda-estrecha. Cartwright y Longuet-Higgins (1956) propusieron un modelo estadístico alternativo para la propagación de las olas en el océano. Su modelo es dado como una función del parámetro espectral de amplitud,  $\varepsilon$ , el cual es dado como una función de los momentos espectrales cero, segundo y cuarto. Goda (1974) apuntó que la distribución de las zero-up-crossing alturas de las olas “puede aproximarse bien” con la distribución de Rayleigh. Se debe mencionar que cuando solamente las zero-up-crossing alturas de olas son consideradas, el proceso efectivamente se vuelve de banda-estrecha y la distribución de Rayleigh por ello puede aplicarse. Como fue demostrado por Cartwright y Longuet-Higgins (1956), lo mismo no puede decirse cuando las olas secundarias son tenidas en cuenta. Forristall (1978) sugirió que la distribución de las alturas de las olas de banda-estrecha podía ser caracterizada por la distribución de Weibull con dos parámetros. Más tarde, Longuet-Higgins (1980) apuntó que la introducción de un factor de escala en la RMS de la altura de ola utilizada en la distribución de Rayleigh daba tan buen resultado como la distribución de Weibull. Soquet-Juglard (2005) aplicaron la distribución de Tayfun (1980) e introdujeron la distribución modificada de Rayleigh para caracterizar la distribución estadística de las crestas de las olas. Soquet-Juglard (2005) también investigaron sobre la aplicación de la distribución Noisy-Weibull introducida por Krunić y Winterstein (2000).

Melbourne (1975, 1977) mostraron otro proceso aleatorio que podía ser caracterizado por la distribución de Weibull, en concreto era la velocidad del viento y la respuesta de altos edificios a su acción. En este caso, el factor de creta de la velocidad del viento y el resultado de la oscilación de edificios altos seguían la distribución de dos parámetros de Weibull. Holmes (1998) presentó una revisión de la aplicación de métodos probabilísticos para caracterizar la carga del viento sobre estructuras. Modelos realísticos utilizados para describir la velocidad del viento extrema incluye la Gaussian (Wing, 1932), la Gumbell tipo I y tipo II (Gumbell, 1954; Thom, 1960) y la del Valor Extremo Generalizado (Jenkinson, 1955).

Rouillard et al. (2001) estudiaron la naturaleza estadística de los perfiles de la carretera y propusieron una técnica para la clasificación y simulación de perfiles aleatorios de carreteras basados en la aceleración espacial de datos

topográficos. Introdujeron la distribución Offset-Rayleigh para caracterizar la RMS desplazada de la aceleración espacial de la superficie de las carreteras para tener en cuenta las circunstancias donde la rugosidad de la carretera nunca alcanza el valor cero.

Rouillard y Sek (2002) investigaron el comportamiento no-estacionario de las vibraciones producidas por vehículos en carretera y propusieron un modelo estadístico para caracterizar la magnitud instantánea de las vibraciones calculadas a través de la transformada de Hilbert. Su modelo, el cual es una versión modificada de la distribución de Rayleigh que incluye un exponente como parámetro y un parámetro de escala, mostró que alcanzaba un éxito moderado para un limitado número de muestras.

Todos los casos anteriormente mencionados han servido para ilustrar que ha habido muchos intentos de caracterizar las propiedades estadísticas de varios procesos aleatorios mediante la aplicación de un amplio abanico de modelos estadísticos. Es evidente que no hay un acuerdo de cuál es el mejor modelo que caracteriza un proceso particular.

## **2.9. IMPACTOS EN EL PROCESO DE DISTRIBUCIÓN.**

En la década pasada hubo un crecimiento en el envío de paquetes individuales entre empresas business-to-business (B2B) y desde empresas a consumidores (B2C). La industria del envío de paquetes es uno de los sectores del transporte y la logística más crecientes tanto en América como en Europa. La industria del envío de paquetes realiza una contribución directa al producto interior bruto de la Unión Europea de unos 10.5 trillones de euros (Oxford Economic Forecasting, 2004). Las empresas de paquetería transportan el 12% del valor total de mercancías, representando un 10% del producto interior bruto de los Estados Unidos (USA) (Park, Regan, 2004). De ahí que sea importante comprender los movimientos físicos que las mercancías embaladas realizan en este entorno de distribución que incluye diversos modos de transporte desde el fabricante hasta el consumidor.

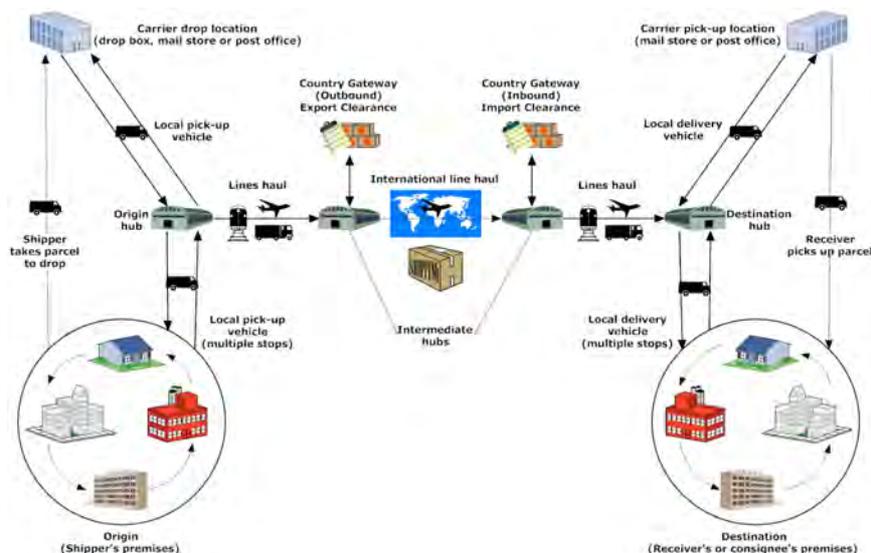


Figura 2.15. Ilustración del proceso de distribución por empresas de paquetería

Desde que las mercancías embaladas son enviadas utilizando varios medios de transporte, ha habido un esfuerzo creciente en medir y analizar los eventos dinámicos que los productos embalados deben soportar en un determinado entorno de distribución. Para los ingenieros de embalaje es importante diseñar embalajes de protección minimizando el uso excesivo de material debido a criterios de conservación medioambiental. Para desarrollar embalajes óptimos es importante que los ingenieros de embalajes conozcan los riesgos físicos y climáticos a los que el producto embalado va a verse sometido durante su distribución y manutención. Esta información les permite diseñar la cantidad correcta de material de amortiguamiento necesaria. Para ayudar a los ingenieros a reducir costes, bien evitando malgastar material de embalaje por sobre-embalaje, o bien evitando daños al producto por un deficiente-embalaje, a lo largo de los últimos 30 años se han ido realizando estudios para determinar los niveles de caídas e impactos producidos en los entornos de distribución.

Goff (1974) estableció los requerimientos necesarios para entornos de distribución de paquetería en USA. Singh y Voss (1992) midieron el entorno de distribución de paquetería por tierra de UPS en USA. Singh y Cheema (1996) midieron el entorno de distribución next-day-air de UPS y FedEx en USA. Singh et al. (2001) midieron el entorno de distribución de paquetes de gran tamaño y gran peso por UPS en USA. El entorno de distribución del second-day-air también fue medido en USA para paquetes

de pequeño tamaño y bajo peso a través de FedEx. (Singh y Burgess, 2004). En un reciente estudio se han comparado los entornos de distribución en USA de FedEx, UPS y DHL para paquetes de peso ligero y tamaño medio (Singh et al., 2006).

La severidad de los impactos a menudo se describe en función de su altura de caída-libre equivalente (EDH) (Brandenburg y June-Ling-Lee, 2001) y de la orientación del impacto, para así facilitar los ensayos de caída en laboratorio. El enfoque generalmente utilizado es utilizar un paquete que contiene un registrador de aceleraciones y procesar los datos obtenidos para obtener una distribución estadística de las alturas de caída esperadas en el proceso de distribución. Por otro lado el método de altura de caída real (RDH) (Kipp, 1998) basado en la medida del tiempo de caída libre, es también usado.



# 3

## OBJETIVOS

---

El presente trabajo tiene como objetivo el profundizar en la generación de nuevo conocimiento dentro del campo de la ingeniería del embalaje en los aspectos particulares relacionados con los procesos del transporte y distribución de productos de consumo embalados. Más concretamente, se trata de mejorar las técnicas actuales de simulación de los riesgos transmitidos al producto y su embalaje en los procesos de transporte y distribución, siendo los objetivos particulares del presente trabajo los siguientes:

1. Medir y analizar las vibraciones producidas por vehículos de transporte de mercancías en las carreteras españolas.
2. Analizar la influencia de la clase de suspensión del vehículo, el nivel de carga utilizado y la velocidad del vehículo en las vibraciones producidas en el transporte por carretera.
3. Comparar los niveles de vibración producidos por vehículos de transporte de mercancías en las carreteras españolas con los

niveles producidos en otros países y los establecidos por las normas ASTM, ISTA e ISO para ensayo en laboratorio.

4. Proponer un nuevo modelo capaz de describir de forma más precisa que el actual el carácter estadístico de las vibraciones aleatorias generadas por vehículos en carretera.
5. Medir y analizar los impactos producidos en los entornos de distribución internacional por vía aérea entre Estados Unidos y España.
6. Comparar la altura de caída máxima esperada en los envíos internacionales por vía aérea entre Estados Unidos y España por las compañías DHL y FedEx.
7. Conocer el efecto que suscita la utilización de etiquetas de aviso de producto frágil en la reducción del número de impactos y de altura de caída máxima esperada en los envíos internacionales por vía aérea entre Estados Unidos y España por las compañías DHL y FedEx.
8. Analizar los errores relativos a la estimación de la altura de caída efectiva EDH.
9. Obtener el método de estimación de la altura de caída efectiva EDH que proporciona el menor error en la estimación.
10. Medir y analizar el comportamiento ante múltiple impactos de materiales de amortiguamiento formados por cartón ondulado multi-capa precomprimido o deformado inicialmente a diferentes niveles.
11. Conocer si un material de amortiguamiento basado en el papel puede ser utilizado para absorber el nivel de aceleración producido en múltiples impactos.
12. Conocer si el daño acumulado en embalajes de cartón ondulado puede ser medido y detectado a través de los parámetros modales del embalaje extraídos de su función de respuesta en frecuencia.

# 4

## HIPÓTESIS

---

### **4.1. FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS.**

Se trabaja con dos tipos de hipótesis. Por un lado, las denominadas hipótesis principales (HP). Éstas deben ser consideradas como las cuestiones principales del presente trabajo. Intentan aportar algo novedoso dentro de la ingeniería del embalaje en los aspectos particulares relacionados con los procesos del transporte y distribución de productos de consumo embalados tratando de mejorar las técnicas actuales de simulación de los riesgos transmitidos al producto y su embalaje en los procesos de transporte y distribución, según la intención de aplicación que se ha expuesto en la introducción.

Por otro lado están las hipótesis de trabajo (HT). La existencia de estas hipótesis es múltiple: a) permiten introducir y ayudar a entender mejor las hipótesis principales; b) intentan dar una base teórica a las hipótesis principales; c) intentan poder dar una visión más amplia a las hipótesis principales; d) son hipótesis que pueden permitir a futuros investigadores avanzar sobre los estudios realizados sobre ellas en el presente trabajo. De alguna forma la búsqueda de estas hipótesis de trabajo permite ampliar las

perspectivas. Será precisa la investigación de las hipótesis de trabajo para avanzar en la consecución de las conclusiones para las hipótesis principales.

A continuación se enumeran las hipótesis a contrastar en los diferentes trabajos realizados y expuestos en las publicaciones del compendio (Anexo):

HP1.0= Los niveles de vibración producidos por vehículos de transporte de mercancías por carreteras dependen del nivel de carga utilizado, la velocidad del vehículo y el tipo de suspensión del vehículo utilizado.

HT1.1= En vibraciones producidas por vehículos de transporte de mercancías por carreteras los niveles de vibración, RMS(G), se incrementan al incrementarse la velocidad del vehículo.

HT1.2= En vibraciones producidas por vehículos de transporte de mercancías por carreteras los niveles de vibración máxima, PEAK(G), se incrementan al incrementarse la velocidad del vehículo.

HP2.0= Los niveles de vibración producidos por vehículos de transporte de mercancías en las carreteras españolas son menores que los niveles establecidos por las normas ASTM, ISTA e ISO para ensayo en laboratorio.

HP3.0= Es posible desarrollar una función PSD escalable en función de la velocidad del vehículo.

HT3.1= La forma de la función PSD que determina las frecuencias predominantes en el espectro de vibraciones producidas por vehículos en carretera es invariante ante el cambio de velocidad del vehículo.

HP4.0= A partir de la distribución estadística de Weibull de tres parámetros se puede generar un nuevo modelo de cuatro parámetros que describe de forma más precisa el carácter estadístico de las vibraciones aleatorias generadas por vehículos en carretera.

HT4.1= Los cuatro parámetros de la nueva distribución estadística de las vibraciones aleatorias generadas por vehículos en carretera son independientes entre ellos.

HT4.2= La nueva distribución estadística de las vibraciones aleatorias generadas por vehículos en carretera reproduce las siguientes distribuciones conocidas (Rayleigh, Chi-Square, Exponencial, Gamma, Pearson tipo III, Weibull de dos y tres parámetros)

HP5.0= Los impactos producidos en los entornos de distribución internacional por vía aérea entre USA y España por las compañías DHL y FedEx no presentan diferencias apreciables.

HT5.1= El entorno de distribución internacional entre USA y España por las compañías DHL y FedEx, es menos severo que el entorno de distribución nacional de los Estados Unidos.

HT5.2= La utilización de etiquetas de aviso de producto frágil no resulta eficaz en la reducción del número de impactos y de altura de caída máxima esperada en los envíos internacionales por vía aérea entre USA y España por las compañías DHL y FedEx.

HP6.0= Los errores medios más bajos en la estimación de la EDH se obtiene con los métodos de cálculo basados en el uso del parámetro del cambio total de velocidad durante el impacto.

HT6.1= Los métodos de cálculo basados en el uso del parámetro del cambio total de velocidad durante el impacto, producen menor variación en el coeficiente de restitución en el proceso de calibración.

HT6.2= Para obtener un error bajo en la estimación de la EDH no es necesario tener en cuenta la orientación del impacto producido en el proceso de calibración del coeficiente de restitución.

HP7.0= Un material de amortiguamiento basado en el papel puede ser utilizado para comportarse de manera similar ante múltiples impactos que otros materiales de amortiguamiento basados en el petróleo.

HT7.1= El comportamiento de materiales de amortiguamiento multi-capa de cartón ondulado en términos de aceleración máxima amortiguada tras múltiples impactos es más estable cuanto mayor es el estado inicial de precompresión o deformación inicial ejercido sobre la muestra.

HT7.2= La respuesta en frecuencia ante un choque en materiales de amortiguamiento multi-capa de cartón ondulado precomprimidos o deformados inicialmente, no varía significativamente después de una treintena de impactos sucesivos.

HP8.0= Se puede detectar el daño acumulado en embalajes de cartón ondulado sometidos continuamente a cargas de compresión dinámicas aleatorias mediante la evaluación de los parámetros modales del sistema extraídos de su función de respuesta en frecuencia.

HT8.1= La inducción de daño a embalajes de cartón ondulado por la aplicación de cargas estáticas de compresión de creciente magnitud es discernible mediante cambios en la frecuencia de resonancia del sistema.

HT8.2= La evolución de la fatiga en el embalaje de cartón ondulado se manifiesta por una ligera pendiente decreciente en los parámetros modales.

HT8.3= El inminente daño en el embalaje de cartón ondulado se manifiesta por un cambio brusco en las pendientes de los parámetros modales.

## **4.2. DEFINICIÓN DE LAS HIPÓTESIS.**

*Definición HP1.0:* La síntesis precisa de vibraciones producidas por vehículos en carretera requiere que el proceso sea profundamente estudiado, y a su vez, cuente con una medida lo más exacta posible. Igualmente, el procedimiento de medida depende de la naturaleza y complejidad del proceso. Aunque las vibraciones verticales en vehículos pueden ser fácilmente medibles, la variabilidad del proceso y la falta de control de los parámetros medidos, hacen difícil, sino imposible, obtener registros que sean típicos de las vibraciones

producidas por vehículos en todas las carreteras. Es necesario llevar a cabo un elevado número de registros de vibraciones, obtenidos bajo diversas condiciones, para obtener estimaciones estadísticas razonables. Lo que se pretende contrastar en esta hipótesis principal es que las vibraciones producidas por vehículos dependen en gran medida de variables como el nivel de carga utilizada en la plataforma de carga, el tipo de suspensión neumática o mecánica de la plataforma del vehículo y de la velocidad que el vehículo está desarrollando en ese momento. Para conseguirlo se analizarán las vibraciones producidas por vehículos que tengan suspensiones diferentes en sus plataformas, en los supuestos de trayecto en carga y descarga y tendiendo en todo momento controlada la velocidad a la que las vibraciones son adquiridas.

*Definición HT1.1:* En esta hipótesis de trabajo se pretende analizar el comportamiento frente a la velocidad del vehículo del valor medio del nivel de vibración, el cual viene expresado por el valor RMS(G). Mediante el análisis de los datos de vibración y velocidad del vehículo obtenidos en las carreteras analizadas se espera que esta hipótesis de trabajo en la que el valor del nivel de vibraciones RMS(G) se incrementa al incrementarse la velocidad del vehículo, sea verificada sin dificultad.

*Definición HT1.2:* En esta hipótesis de trabajo lo que se pretende analizar es el comportamiento frente a la velocidad del vehículo de los valores de vibración o excusión máxima. Del mismo modo que en la definición de la hipótesis de trabajo anterior, la hipótesis actual en la que el valor de PEAK(G) se incrementa al incrementarse la velocidad del vehículo, se espera que sea verificada sin problemas, mediante el análisis de los datos de vibración y velocidad del vehículo obtenidos en las carreteras analizadas.

*Definición HP2.0:* Las normas ASTM, ISTA e ISO representan la función PSD general de camiones basadas en medias de registros de vibración medidos a lo largo de un determinado número de clases de suspensión, carga, velocidad y superficie de la carretera. Afirman que los perfiles PSD de ensayo, figuras 2.9 y 2.10, son proporcionados únicamente con propósito de informar, y no pretenden describir de forma precisa un entorno de transporte o distribución específico y que además los ensayos de vibración aleatoria deberían ser basados en registros de campo representativos. A pesar de esto, las curvas de la

figura 2.10 son recomendadas como espectros de ensayo, con intensidad y duración, en la norma ASTM D4169-01. Las especificaciones de las normas ASTM D4728-01 y D4169-01, y en particular el espectro general para camiones con el nivel de seguridad II, es quizás el comúnmente más utilizado procedimiento de ensayos para validación y desarrollo de embalajes a lo largo de todo el mundo (Kipp, 2000b). El propósito de esta hipótesis principal es conocer donde se encuentran los niveles de vibración del transporte por carretera en España en comparación con los que establecen las normas de ensayo y simulación los cuales han sido obtenidos generalmente de datos medidos en USA. Para conseguirlo se analizarán las vibraciones producidas por las mismas configuraciones establecidas para la hipótesis principal anterior y se compararán con los niveles establecidos por las normas.

Definición HP3.0: Las técnicas que se siguen utilizando en estos días para simulación en laboratorio de vibraciones de vehículos en carretera dependen en gran parte de seleccionar una función PSD de vibración que sea la idónea de entre diversas fuentes. La falta de información en niveles de vibración requiere el uso de niveles RMS de vibración esperados, los cuales pueden o no, ser representativos de un determinado entorno de distribución. Si pudiéramos obtener una función PSD que dependiera exclusivamente de los medios de transporte utilizados, y no de la velocidad con la que el vehículo se desplaza, sólo deberíamos de volcar nuestros esfuerzos en analizar y sintetizar los niveles RMS de vibración esperados según la velocidad del vehículo. En otras palabras, el propósito de esta hipótesis principal es la de analizar si es posible el desarrollar una función PSD que sea escalable en el nivel de vibración RMS en función de la velocidad del vehículo. Para ello nos serviremos tanto de las vibraciones producidas por las mismas configuraciones establecidas para las hipótesis principales anteriores y de los resultados la hipótesis de trabajo siguiente.

Definición HT3.1: En esta hipótesis de trabajo se pretende obtener que la forma de la función PSD que determina las frecuencias predominantes en el espectro de vibraciones producidas por vehículos en carretera es invariante ante el cambio de velocidad del vehículo, lo cual de confirmarse ayudará a validar la hipótesis principal.

Definición HP4.0: La principal limitación de utilizar el PSD como un solo descriptor de las vibraciones producidas por vehículos en carretera es que los procesos aleatorios de vibración a ser simulados son asumidos normalmente-distribuidos (Gaussian) y estacionarios de ahí que sean caracterizados con la función media PSD la cual también indica un nivel RMS medio. Esto, por descontado, ofrece ventajas significativas en términos de compactación de datos, como también, el de ser compatible con el proceso utilizado para sintetizar señales aleatorias normalmente-distribuidas de una única función espectral que representa la función media PSD del proceso. Sin embargo, no reproduce la no-estacionariedad del proceso vibratorio. Rouillard y Sek (2000a) propusieron una técnica de simulación que reproduce las variaciones de amplitud del proceso siempre que se conozca la distribución de la raíz del valor medio al cuadrado (RMS) de la señal de vibración. Por lo tanto el propósito de esta hipótesis principal es la de generar un nuevo modelo que describa de una forma más precisa que el actual el carácter estadístico de las vibraciones aleatorias RMS generadas por vehículos en carretera. Para ello se partirá de la distribución estadística actual más precisa, la Weibull de tres parámetros, para generar un nuevo modelo de cuatro parámetros.

Definición HT4.1: Que los cuatro parámetros de la nueva distribución estadística de las vibraciones aleatorias generadas por vehículos en carretera sean independientes es necesario para contrastar la hipótesis principal, siendo la validación de esta independencia de parámetros el propósito de la presente hipótesis de trabajo.

Definición HT4.2: En esta hipótesis de trabajo se pretende analizar la potencia de la nueva distribución estadística en reproducir el abanico amplio de distribuciones estadísticas ya conocidas en los procesos de vibración aleatoria como la Rayleigh, Weibull de dos y tres parámetros, y las ya conocidas en otros procesos estadísticos como la Chi-Square, Gamma y Pearson tipo III. Cuantas más distribuciones reproduzca mayor será la versatilidad de reproducir los parámetros estadísticos de cualquier proceso de vibración aleatoria, ayudando con ello a validar la hipótesis principal.

Definición HP5.0: La industria del envío de paquetes es uno de los sectores del transporte y la logística más crecientes tanto en América como en Europa. De ahí que sea importante comprender los

movimientos físicos que las mercancías embaladas realizan en este entorno de distribución que incluye diversos modos de transporte desde el fabricante hasta el consumidor. Desde que las mercancías embaladas son enviadas utilizando varios medios de transporte, ha habido un esfuerzo creciente en medir y analizar los eventos dinámicos que los productos embalados deben soportar en un determinado entorno de distribución. Por lo tanto con la presente hipótesis principal se propone analizar el entorno de distribución aéreo entre USA y España por las compañías DHL y FedEx. Debido a que ambas compañías utilizan aviones y procesos de gestión y manutención similares es de esperar que se valide la hipótesis principal de no presentar diferencias apreciables el nivel de severidad entre las compañías DHL y FedEx.

*Definición HT5.1:* Goff (1974) estableció los requerimientos necesarios para entornos de distribución de paquetería en USA. Singh y Voss (1992) midieron el entorno de distribución de paquetería por tierra de UPS en USA. Singh y Cheema (1996) midieron el entorno de distribución next-day-air de UPS y FedEx en USA. Singh et al. (2001) midieron el entorno de distribución de paquetes de gran tamaño y gran peso por UPS en USA. El entorno de distribución del second-day-air también fue medido en USA para paquetes de pequeño tamaño y bajo peso a través de FedEx (Singh y Burgess, 2004). En un reciente estudio se han comparado los entornos de distribución en USA de FedEx, UPS y DHL para paquetes de peso ligero y tamaño medio (Singh et al., 2006). Como podemos deducir el entorno de distribución nacional de USA ha sido el centro de las investigaciones de los últimos años. Por lo tanto sólo podemos comparar el nivel de severidad del entorno de distribución internacional entre USA y España por las compañías DHL y FedEx, con el entorno de distribución nacional de USA, siendo el propósito de la presente hipótesis de trabajo el confirmar que el entorno internacional de distribución entre España y USA es menos severo que el nacional de USA del que ya se dispone de datos.

*Definición HT5.2:* Todos pensamos que la utilización de etiquetas de aviso de fragilidad puestas en la superficie de un embalaje hace que éste sea tratado con más suavidad en las tareas de distribución y manutención que otro embalaje de la misma forma y tamaño que no las tenga. Este pensamiento que todos tenemos es equivocado, siendo objetivo de la presente hipótesis de trabajo

el confirmar que la utilización de etiquetas de aviso de producto frágil no resulta eficaz en la reducción del número de impactos y de altura de caída máxima esperada en los envíos internacionales por vía aérea entre USA y España por las compañías DHL y FedEx.

Definición HP6.0: La severidad de los impactos a menudo se describe en función de su altura de caída-libre equivalente (EDH) (Brandenburg y June-Ling-Lee, 2001) y de la orientación del impacto, para así facilitar los ensayos de caída en laboratorio. El enfoque generalmente utilizado es utilizar un paquete que contiene un registrador de aceleraciones y procesar los datos obtenidos para obtener una distribución estadística de las alturas de caída esperadas en el proceso de distribución. Es por ello necesario estimar la EDH con la mayor precisión posible. Lo que se pretende contrastar en esta hipótesis principal es que los errores medios más bajos en la estimación de la EDH se obtienen con los métodos de cálculo basados en el uso del parámetro del cambio total de velocidad durante el impacto.

Definición HT6.1: Para la estimación de la altura de caída se han estado utilizando tanto métodos basados en la obtención de la velocidad de impacto del embalaje, como métodos basados en el cambio total de velocidad durante el impacto. El problema de los basados en la velocidad del impacto radica en que no es posible determinar el momento exacto en el que sucede esa velocidad de impacto en el embalaje. Por lo tanto el objetivo de la presente hipótesis de trabajo es el de confirmar que los métodos de cálculo basados en el uso del parámetro del cambio total de velocidad durante el impacto, producen menor variación en el coeficiente de restitución en el proceso de calibración.

Definición HT6.2: Un parámetro que a priori podemos pensar que puede mejorar en exceso tenerlo en cuenta para la estimación de la EDH, es la orientación del impacto en el proceso de calibración. Sin embargo, la presente hipótesis de trabajo trata de contrastar que esa mejora es relativamente insignificante con el consumo de tiempo que este parámetro supone en la calibración del instrumento. Es decir que para obtener un error bajo en la estimación de la EDH no es necesario tener en cuenta la orientación del impacto producido en el proceso de calibración del coeficiente de restitución.

Definición HP7.0: Debido al impacto negativo medioambiental de los materiales utilizados como amortiguamiento de productos embalados, tales como el poliestireno expandido, está habiendo un creciente interés en uno de los materiales más disponible y renovable, el papel, como sustituto. En la comunidad científica todavía tienen dudas de que estos materiales basados en el papel sean capaces de mantener sus propiedades de amortiguamiento tras una sucesión de impactos repetitivos. Por lo tanto lo que se pretende contrastar en esta hipótesis principal es que un material de amortiguamiento basado en el papel puede ser utilizado para comportarse de manera similar ante múltiples impactos que otros materiales de amortiguamiento basados en el petróleo.

Definición HT7.1: La disponibilidad del cartón ondulado es abundante, pero en su forma original se comporta de manera muy pobre como material de amortiguamiento. Gordon (1972) fue el primero en investigar las características como material de amortiguamiento del cartón ondulado multi-capa. Relevantes investigaciones han sido realizadas en los últimos años por Sek (1999), Sek y Kikpatrick (2001), Sek y Rouillard (2005 y 2006) proponiendo una mejora en el diseño de estos materiales como materiales de amortiguamiento. Por lo tanto la presente hipótesis de trabajo trata de contrastar que el comportamiento de materiales de amortiguamiento multi-capa de cartón ondulado en términos de aceleración máxima amortiguada tras múltiples impactos es más estable cuanto mayor es el estado inicial de precompresión o deformación inicial ejercido sobre la muestra, ayudando con ello a validar la hipótesis principal.

Definición HT7.2: Que la respuesta en frecuencia ante un choque en materiales de amortiguamiento multi-capa de cartón ondulado pre-comprimidos o deformados inicialmente, no varía significativamente después de una treintena de impactos sucesivos es necesario para contrastar la hipótesis principal, siendo la validación de esta invarianza significativa en las características del amortiguamiento del material multi-capa de cartón ondulado, el propósito de la presente hipótesis de trabajo.

Definición HP8.0: Actualmente no hay establecido un método por el cual se pueda medir la capacidad que tiene un embalaje de cartón ondulado en soportar cargas dinámicas de compresión por periodos

largos (Sek y Rouillard, 1993; Rouillard y Sek, 2000b). Lo que se pretende contrastar en esta hipótesis principal es que se puede detectar el daño acumulado en embalajes de cartón ondulado sometidos continuamente a cargas de compresión dinámicas aleatorias mediante la evaluación de los parámetros modales del sistema extraídos de su función de respuesta en frecuencia. Para ello los métodos por el cual la detección del daño sostenido a una estructura utilizando los cambios observados en su comportamiento dinámico característico están bien determinados (Doebbling et al., 1996).

*Definición HT8.1:* Para ayudar a validar la hipótesis principal es necesario la realización de una serie de experimentos exploratorios iniciales en los que la hipótesis de trabajo a contrastar es que la inducción de daño a embalajes de cartón ondulado por la aplicación de cargas estáticas de compresión de creciente magnitud es discernible mediante cambios en la frecuencia de resonancia del sistema.

*Definición HT8.2:* Otra hipótesis de trabajo necesaria para contrastar la hipótesis principal es que podamos de alguna manera observar la evolución de la fatiga en el embalaje de cartón ondulado siendo el objetivo de esta hipótesis de trabajo el contrastar que la evolución de la fatiga en el embalaje de cartón ondulado se manifiesta por una ligera pendiente decreciente en los parámetros modales.

*Definición HT8.3:* Igualmente que la hipótesis de trabajo anterior, contrastar que el inminente daño en el embalaje de cartón ondulado se manifiesta por un cambio brusco en las pendientes de los parámetros modales, objetivo de la presente hipótesis de trabajo, ayuda a contrastar la hipótesis principal.



# 5 MATERIALES Y MÉTODOS

---

Los objetivos e hipótesis de la presente tesis doctoral, justificados y detallados en los apartados anteriores, han sido desarrollados en diferentes trabajos de investigación que han dado lugar a las publicaciones incluidas en el compendio que se adjunta (Anexo). En dichas publicaciones se detallan los experimentos, con sus materiales y metodologías empleadas para cada una de las investigaciones parciales que conforman la tesis doctoral.

Para una mejor comprensión de este apartado de materiales y métodos, a continuación se muestra de forma esquemática los objetivos e hipótesis que son tratados y estudiados en los diferentes trabajos de investigación publicados de la presente tesis doctoral:

- ARTÍCULO 1. Medida y análisis del entorno de distribución aéreo de mercancías enviadas mediante DHL y FedEx entre Europa y USA

→ HP5.0 (HT5.1, HT5.2)

- ARTÍCULO 2. Medida y análisis de los niveles de vibración que se transmite a la mercancía en el transporte por carretera en España en función de la carga, el tipo de suspensión y la velocidad del vehículo.
  - HP1.0 (HT1.1, HT1.2)
  - HP2.0
  - HP3.0 (HT3.1)
  
- ARTÍCULO 3. Interpretando los datos de impactos para la estimación de los niveles de altura de caída durante el entorno de distribución.
  - HP6.0 (HT6.1, HT6.2)
  
- ARTÍCULO 4. Monitorizando la evolución de la fatiga en embalajes de cartón ondulado sometidos a cargas dinámicas de compresión aleatorias.
  - HP8.0 (HT8.1, HT8.2, HT8.3)
  
- ARTÍCULO 5. Nuevo modelo de distribución estadística de las vibraciones aleatorias generadas por vehículos en carretera.
  - HP4.0 (HT4.1, HT4.2)
  
- ARTÍCULO 6. Efecto de la compresión inicial en material de amortiguamiento de cartón ondulado en las características de atenuación ante repetitivos impactos.
  - HP7.0 (HT7.1, HT7.2)

### 5.1. ARTÍCULO 1. Medida y análisis del entorno de distribución aéreo de mercancías enviadas mediante DHL y FedEx entre Europa y USA.

Para contrastar las hipótesis, tanto de trabajo como principales que engloba el presente artículo, se diseñó el experimento que se describe a continuación.

El registrador de datos utilizado, para obtener los impactos del entorno de distribución objeto del presente estudio, fue el Environmental Data Recorder-3C (EDR-3C) fabricado por Instrumented Sensor Technology (IST) que se muestra en la figura 5.1. Este registrador está diseñado para medir cualquier impacto, la orientación del mismo, vibraciones, temperatura, humedad y cambios de presión durante un envío en cualquier entorno de distribución.

Los parámetros de configuración del EDR-3C se establecieron en:

- Pre-trigger: 30 muestras
- Post-trigger: 150 muestras
- Frecuencia de muestreo: 3200 hz
- Trigger-level: 14 G
- Tiempo muerto después de un evento: 140 ms
- Modo de grabación: fill & stop



Figura 5.1. Embalajes de ensayo

Los embalajes utilizados para enviar las unidades EDR-3C fueron fabricados introduciendo espuma de polietileno de alta densidad dentro de una carcasa de plástico reutilizable de dos piezas con cierre metálico, todo ello colocado dentro de una caja de cartón ondulado sellada con cinta adhesiva. Las dimensiones de la caja eran de 0.36m x 0.34m x 0.34m y 6.5 kg de peso con el registrador en su interior (figura 5.1)

Doce paquetes fueron enviados a Valencia-España desde East Lansing, Michigan-USA, y viceversa. Seis de ellos a través de FedEx y otros seis a través de DHL. Para poder medir el efecto de las etiquetas de aviso de fragilidad en la severidad de la manutención de los paquetes enviados, la mitad llevaban etiquetas de aviso de fragilidad colocadas en todas sus caras (figura 5.2)



Figura 5.2. Embalajes de ensayo con etiquetas de aviso de fragilidad

El proceso de envío y retorno de cada embalaje se llevó a cabo entre 10 y 15 días, dependiendo del tiempo en el proceso de aduanas (figura 2.15). De vuelta los paquetes en USA, los datos (figura 5.3) fueron extraídos de los EDR-3C, tabulados y analizados.

El método de cálculo utilizado para estimar la altura de caída correspondiente a los datos extraídos de los EDR-3C, fue el EDH-Effective Drop Height (ecuación 5.1)

$$EDH = \frac{\Delta V^2}{2 \cdot g \cdot (1+e)^2} \quad (5.1)$$

donde “g” es la aceleración de la gravedad, “ΔV” es el cambio de velocidad del pulso gravado y “e” es el coeficiente de restitución entre el embalaje y la superficie de impacto.

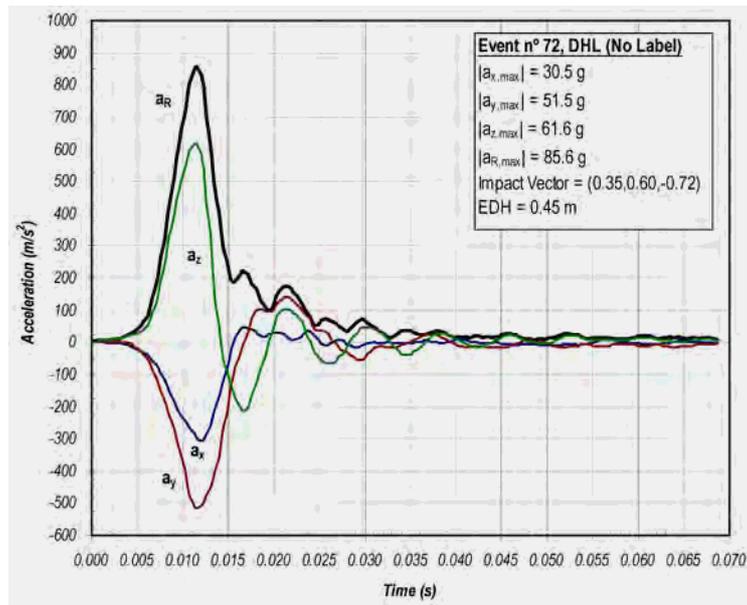


Figura 5.3. Ejemplo de pulso registrado en el proceso de distribución

Previamente a la aplicación de la ecuación de la EDH, fue necesario calibrar el embalaje de ensayo. El proceso de calibración utilizado fue similar al realizado en otros estudios de investigación de entornos de distribución por investigadores de USA. Los embalajes fueron arrojados desde varias alturas conocidas, un número determinado de veces desde cada orientación (cara, arista, esquina), utilizando una máquina de caída libre. El software DynaMax Suite de IST procesó y creó los valores del coeficiente de restitución que calibraba el método EDH.

Los datos analizados, por empresa de transporte estudiada (FedEx, DHL) y por presencia o no de etiqueta de aviso de fragilidad, fueron los siguientes:

- Altura máxima y media de caída esperada.
- Altura máxima de caída esperada para niveles de probabilidad del 99 %, 95 % y 90 % y función de distribución acumulada de las alturas de caída esperadas.
- Número medio de impactos o caídas acaecidas en un viaje.
- % de impactos producidos en caras, aristas y esquinas.

**5.2. ARTÍCULO 2. Medida y análisis de los niveles de vibración que se transmite a la mercancía en el transporte por carretera en España en función de la carga, el tipo de suspensión y la velocidad del vehículo.**

El experimento que se describe a continuación se diseñó para medir y analizar los niveles de vibración producidos en el transporte por vehículos en carreteras españolas, según la suspensión de la plataforma del vehículo, la carga y su velocidad, y así contrastar las hipótesis, tanto de trabajo como principales que engloba el presente artículo.

Los vehículos utilizados en el presente estudio fueron:

- Camión semi-trailer con cabeza tractora (Renault Magnum 480) de doble eje con suspensiones neumáticas y semi-trailer (Guillém G100 de 30000 kg de capacidad) de tres ejes con suspensiones neumáticas (figura 5.4)
- Camión semi-trailer con cabeza tractora (Mercedes) de doble eje con suspensiones neumáticas y semi-trailer (Prim Ball de 30000 kg de capacidad) de tres ejes con suspensiones mecánicas/ballestas (figura 5.4)



Figura 5.4. Izq.: Trailer con suspensión neumática. Der.: Trailer con suspensión mecánica

El equipamiento utilizado fue:

- Tres registradores de vibraciones de Lasmont Corporation; dos modelo Saver 9x30 y un Saver 3x90.
- Un registrador de datos GPS+GSM modelo TecnoGPS AVL Inc.
- Un ordenador portátil modelo Datellite L-20-101 de la compañía Toshiba Inc.

Los registradores de vibraciones fueron colocados sobre el eje delantero y el trasero de la plataforma de carga de ambos vehículos. El GPS+GSM fue colocado en ambos vehículos. La figura 5.5 muestra exactamente la instalación de estos equipos.



Figura 5.5. Instalación de los registradores de vibraciones y del GPS+GSM

Antes de realizar los trayectos con los vehículos por las carreteras españolas se configuraron los parámetros de los registradores:

- Datos de eventos de señal:
  - Tiempo de grabación de cada evento: 8192 ms
  - Frecuencia de muestreo: 1000 hz
  - Pre-trigger: 20 %
  - Trigger-level: 0.5 G
  - Máximo de escala: 50 G
  - Filtro: 500 hz

- Datos de eventos de tiempo:
  - Tiempo de grabación de cada evento: 8192 ms
  - Frecuencia de muestreo: 1000 hz
  - Tiempo de muestreo: 60 s
  - Máximo de escala: 50 G
  - Filtro: 500 hz
  
- Datos de medida de velocidad:
  - Tiempo de muestreo: 60 s
  - Periodo de transferencia FTP: 1 hora
  - Datos a registrar: Fecha/hora, latitud/longitud, velocidad (km/h)
  - Reloj sincronizado con los registradores de vibración

Cuatro trayectos fueron realizados, dos con cada vehículo para obtener las vibraciones en cuatro configuraciones de ensayo distintas (dos con diferentes niveles de carga y otras dos con diferentes suspensiones de plataforma de carga):

- Trayecto 1 (figura 5.6):
  - Salida: Moncada (Valencia)
  - Llegada: Palau de Plegamans (Barcelona)
  - Distancia recorrida: 365 km
  - Vehículo semi-trailer con suspensiones mecánicas en la plataforma de carga
  - Carga: 3000 kg
  
- Trayecto 2 (figura 5.6):
  - Salida: Sentmenat (Barcelona)
  - Llegada: Moncada (Valencia)
  - Distancia recorrida: 365 km

- Vehículo semi-trailer con suspensiones mecánicas en la plataforma de carga
- Carga: 0 kg

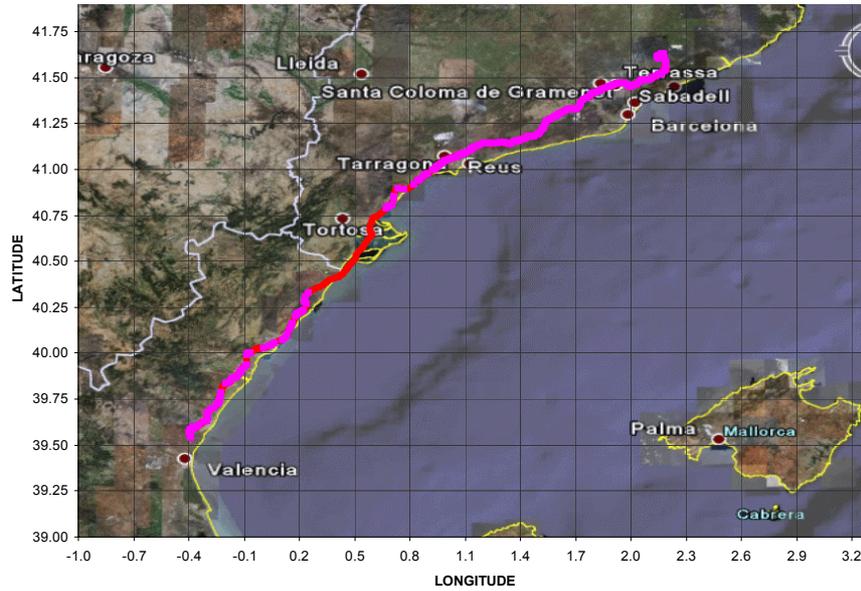


Figura 5.6. Ruta de los trayectos 1 y 2

- Trayecto 3 (figura 5.7):
  - Salida: Yuncos (Toledo)
  - Llegada: Aspe (Alicante)
  - Distancia recorrida: 387 km
  - Vehículo semi-trailer con suspensiones neumáticas en la plataforma de carga
  - Carga: 21000 kg
- Trayecto 4 (figura 5.7):
  - Salida: Alcoy (Alicante)
  - Llegada: Yuncos (Toledo)
  - Distancia recorrida: 387 km

- Vehículo semi-trailer con suspensiones neumáticas en la plataforma de carga
- Carga: 3300 kg

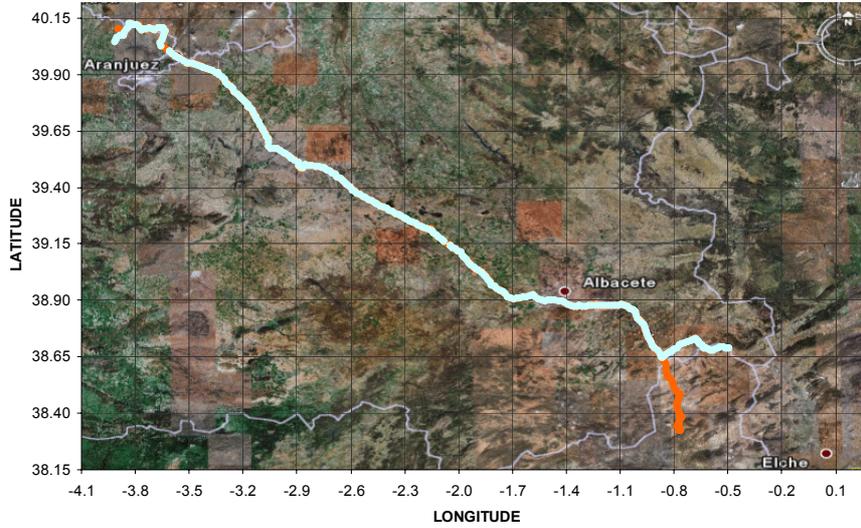


Figura 5.7. Ruta de los trayectos 3 y 4

Los datos obtenidos fueron analizados para determinar la densidad de potencia de los niveles de vibración asociada a una frecuencia determinada. Para representar todas las densidades de potencia de los niveles de vibración asociadas a todo el espectro de frecuencia (0-500 hz) se utilizó la función de densidad espectral de potencia (PSD).

El método de cálculo utilizado para obtener la función PSD fue el de someter a cada registro de aceleración obtenido de 8192 ms a la transformada rápida de Fourier (FFT) y calcular su espectro de magnitud plegado  $G_{f,i}$ . La resolución en frecuencia de la FFT “ $\Delta f = s_f \cdot (\text{FFTsize})^{-1}$ ” era de  $\cong 0.1221$  Hz. El espectro de magnitud fue convertido a espectro de potencia y normalizado en la función PSD dividiendo los espectro de potencia por  $\Delta f$ , y producir así la función PSD en  $G^2/\text{Hz}$ . Las funciones promediadas PSD finalmente obtenidas, son promedios lineales de las funciones PSD de todos los eventos o registros obtenidos y seleccionados.

$$\text{Promedio}(PSD)_f = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n PSD_{f,i} = \frac{1}{2 \cdot n \cdot \Delta f} \sum_{i=1}^n G_{f,i}^2 \quad f = 0, \Delta f, 2\Delta f, \dots, \frac{\text{FFT size}}{2} \Delta f \quad (5.2)$$

$$G_{f,i} = 2 \cdot \left| \frac{FFT \frac{f}{\Delta f} \{a_{i,t_1}, a_{i,t_2}, \dots, a_{i,t_{FFT \text{ size}}} \}}{FFT \text{ size}} \right| \quad \begin{array}{l} f = 0, 1, 2, \dots, \frac{FFT \text{ size}}{2} \\ i = 1, 2, 3, \dots, n \end{array} \quad (5.3)$$

donde  $G_{f,i}$  es el módulo del espectro de aceleración en “g” asociado con una frecuencia determinada del espectro “f” y un evento o registro determinado “i”, “n” es el número de eventos o registros seleccionados, “FFT size” es el número de instantes muestreados para un registro o evento determinado, “ $\Delta f = (\text{frecuencia de muestreo}) \cdot (\text{FFTsize})^{-1}$ ” es la resolución del espectro de frecuencia y “ $a_{i,t}$ ” es la aceleración registrada en “g” para cada evento o registro determinado “i” en el tiempo “t”.

Los espectros analizados con el método descrito puede ser usado para comparar los niveles de vibración y sus frecuencias según diversos trayectos, regiones y equipos logísticos. Los datos para cada trayecto fueron filtrados previamente a la aplicación del método de cálculo, ignorando aquellos registros cuya velocidad del vehículo era nula y separando los registros en tres grupos de velocidad, 0-40 km/h, 40-70 km/h, >70 km/h.

Para cada evento registrado se realizaron los siguientes cálculos:

- La raíz cuadrada del valor medio (RMS)
- La máxima aceleración instantánea (PEAK)
- El factor de cresta PEAK/RMS
- La función PSD del 100% de los eventos registrados, la función PSD del 25% de los eventos más severos y la función PSD del 75% de los eventos menos severos.

Para cada grupo de velocidad y trayecto se realizaron los siguientes cálculos:

- La función de distribución acumulada (CDF) de la RMS, de la máxima aceleración instantánea y del factor de cresta, encajados en un modelo modificado de cuatro parámetros de Weibull
- La función PSD

- La media, mediana y desviación estándar de la RMS, de la máxima aceleración instantánea y del factor de cresta, de cada distribución obtenida.

### 5.3. ARTÍCULO 3. Interpretando los datos de impactos para la estimación de los niveles de altura de caída durante el entorno de distribución.

El experimento que se describe a continuación se diseñó para obtener el método que basado en parámetros obtenidos de impactos registrados por acelerómetros, mejor estima la altura de caída efectiva, y así contrastar las hipótesis, tanto de trabajo como principal que engloba el presente artículo.

72 impactos en total fueron llevados a cabo, desde 6 alturas diferentes de caída (18, 24, 30, 36, 42 y 48 pulgadas) y 4 impactos en cada orientación (cara, arista y corner). Las caídas fueron realizadas desde una máquina de ensayos de caída libre fabricada por Lansmont Corporation. El registrador de datos utilizado, para registrar los impactos, fue el Environmental Data Recorder-3C (EDR-3C) fabricado por Instrumented Sensor Technology (IST) que se muestra es la figura 5.8.

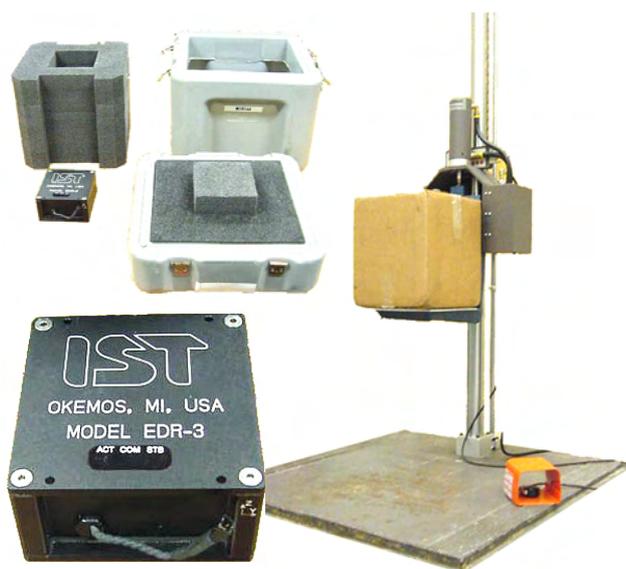


Figura 5.8. Equipamiento utilizado

El embalaje de ensayo se construyó insertando el registrador de datos entre bloques de espuma de polietileno de alta densidad dentro de una carcasa de plástico reutilizable de dos piezas con cierre metálico, todo ello colocado dentro de una caja de cartón ondulado sellada con cinta adhesiva. Las dimensiones de la caja eran de 0.36m x 0.34m x 0.34m y 6.5 kg de peso con el registrador en su interior (figura 5.1)

Los parámetros de configuración del EDR-3C se establecieron en:

- Pre-trigger: 40 muestras
- Post-trigger: 125 muestras
- Frecuencia de muestreo: 3200 hz
- Trigger-level: 14 G

La severidad de los impactos o pulsos registrados por los EDR-3C se suele describir en términos de su altura de caída efectiva (EHD) y de la orientación del impacto, con el fin de facilitar ensayos de laboratorio realizados con máquinas de caída. La aproximación preferida se basa en obtener los impactos con registradores tri-axiales y procesar los datos de manera que se obtenga una distribución estadística de las alturas de caída y las orientaciones esperadas. Para estimar las alturas de caída a través de los datos registrados por los EDR-3C existen dos métodos; el método de altura real de caída (RDH), basado en la medida del tiempo que tarda en golpear el objeto de ensayo el suelo desde que es arrojado desde una altura determinada, durante una caída libre (figura 5.9); y el método de altura de caída efectiva (EDH), basado en los parámetros del pulso registrado en un impacto, choque o caída, (figura 5.10)

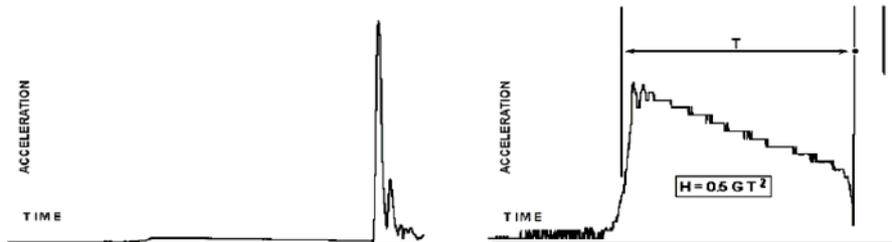


Figura 5.9. Método de cálculo de la RDH

El método RDH se utiliza principalmente para diferenciar los eventos que son producidos por caídas libres de los eventos que son producidos por

impactos, choques y caídas complejas. El método RDH detecta la ocurrencia de una caída libre determinando el intervalo de tiempo transcurrido hasta el impacto. El cambio total de velocidad ( $\Delta V$ ) obtenido del pulso registrado en el impacto se compara con el predicho por el RDH para verificar si el evento fue o no producido por una caída libre.

La investigación que engloba el presente artículo, está enfocada al método EDH y al uso de los parámetros característicos de los choques o pulsos medidos con un acelerómetro tri-axial para estimar la EDH con el método más preciso. La EDH puede ser determinada mediante la siguiente expresión:

$$EDH = \frac{v_{impact}^2}{2g} = \frac{\Delta V^2}{2g(1+e)^2} \quad (5.4)$$

La ecuación anterior demuestra que para computar la EDH es necesario conocer, bien, el momento en que la velocidad alcanza el valor cero, o bien, una estimación muy aproximada del coeficiente de restitución ( $e$ ) entre el embalaje de ensayo y la superficie de impacto. Ambas aproximaciones suponen un problema pues la información necesaria no puede establecerse de manera fiable a partir de un pulso o choque para cada evento producido durante la distribución. En consecuencia aspectos relacionados a la calibración del embalaje de ensayo se abordan en este estudio. La figura 5.10 muestra un pulso o choque tri-axial típico y la aceleración resultante correspondiente, con la nomenclatura utilizada.

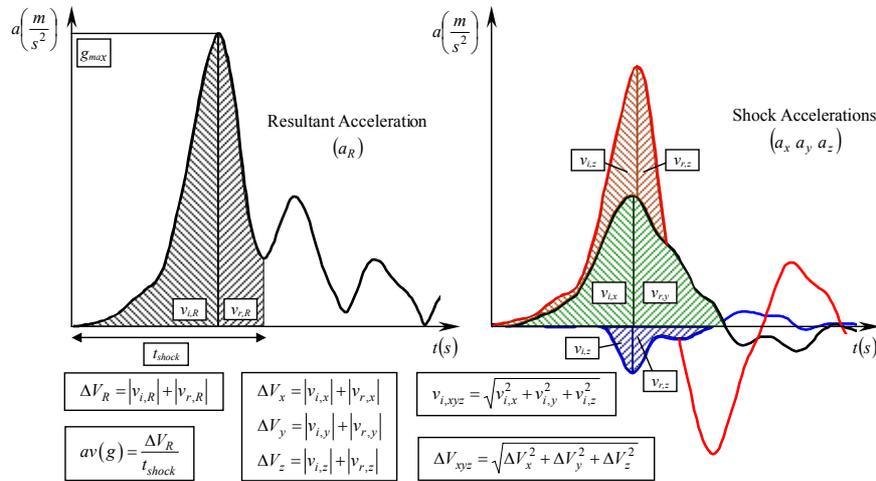


Figura 5.10. Cálculo de los parámetros característicos del pulso de choque

Las definiciones de seis métodos de calibración y sus correspondientes errores se muestran en las figuras 5.11 y 5.12. La figura 5.14 explica el algoritmo para la calibración de la EDH, y la figura 5.15 el algoritmo para el cálculo de los errores.

$$\begin{aligned}
 \text{Method 1} &\rightarrow \begin{cases} EDH_{m,io,1} = \frac{v_{i,xyz}^2}{2 \cdot g} \cdot \bar{c}_{io,1} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \forall io = \{Edge, Face, Corner\} \\ \forall m = 1, 2, \dots, N_{io} \end{array} \right\} \\ EDH_{m,1} = \frac{v_{i,xyz}^2}{2 \cdot g} \cdot \bar{c}_1 \rightarrow \{ \forall m = 1, 2, \dots, N_{shocks} \} \end{cases} \\
 \\
 \text{Method 2} &\rightarrow \begin{cases} EDH_{m,io,2} = \frac{v_{i,R}^2}{2 \cdot g} \cdot \bar{c}_{io,2} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \forall io = \{Edge, Face, Corner\} \\ \forall m = 1, 2, \dots, N_{io} \end{array} \right\} \\ EDH_{m,2} = \frac{v_{i,R}^2}{2 \cdot g} \cdot \bar{c}_2 \rightarrow \{ \forall m = 1, 2, \dots, N_{shocks} \} \end{cases} \\
 \\
 \text{Method 3} &\rightarrow \begin{cases} EDH_{m,io,3} = \frac{\Delta V_{xyz}^2}{2 \cdot g \cdot (1 + \bar{e}_{io,3})^2} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \forall io = \{Edge, Face, Corner\} \\ \forall m = 1, 2, \dots, N_{io} \end{array} \right\} \\ EDH_{m,3} = \frac{\Delta V_{xyz}^2}{2 \cdot g \cdot (1 + \bar{e}_3)^2} \rightarrow \{ \forall m = 1, 2, \dots, N_{shocks} \} \end{cases} \\
 \\
 \text{Method 4} &\rightarrow \begin{cases} EDH_{m,io,4} = \frac{\Delta V_R^2}{2 \cdot g \cdot (1 + \bar{e}_{io,4})^2} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \forall io = \{Edge, Face, Corner\} \\ \forall m = 1, 2, \dots, N_{io} \end{array} \right\} \\ EDH_{m,4} = \frac{\Delta V_R^2}{2 \cdot g \cdot (1 + \bar{e}_4)^2} \rightarrow \{ \forall m = 1, 2, \dots, N_{shocks} \} \end{cases} \\
 \\
 \text{Method 5} &\rightarrow \begin{cases} EDH_{m,io,5} = \frac{(g_{\max}^2 - g^2) \cdot t_{shock}^2}{2 \cdot g \cdot \pi^2} \cdot \bar{c}_{io,5} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \forall io = \{Edge, Face, Corner\} \\ \forall m = 1, 2, \dots, N_{io} \end{array} \right\} \\ EDH_{m,5} = \frac{(g_{\max}^2 - g^2) \cdot t_{shock}^2}{2 \cdot g \cdot \pi^2} \cdot \bar{c}_5 \rightarrow \{ \forall m = 1, 2, \dots, N_{shocks} \} \end{cases} \\
 \\
 \text{Method 6} &\rightarrow \begin{cases} EDH_{m,io,6} = \frac{\left( av(g)^2 \cdot \frac{\pi^2}{4} - g^2 \right) \cdot t_{shock}^2}{2 \cdot g \cdot \pi^2} \cdot \bar{c}_{io,6} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \forall io = \{Edge, Face, Corner\} \\ \forall m = 1, 2, \dots, N_{io} \end{array} \right\} \\ EDH_{m,6} = \frac{\left( av(g)^2 \cdot \frac{\pi^2}{4} - g^2 \right) \cdot t_{shock}^2}{2 \cdot g \cdot \pi^2} \cdot \bar{c}_6 \rightarrow \{ \forall m = 1, 2, \dots, N_{shocks} \} \end{cases}
 \end{aligned}$$

Figura 5.11. Definición de los métodos de cálculo de la EDH

Error of each shock pulse

$$Error_{m,cal\_io,n}(\%) = 100 \cdot \left| \frac{EDH_{m,io,n} - H_{drop,tester,m,io}}{H_{drop,tester,m,io}} \right| \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \text{taking into account} \\ \text{the impact orientation} \\ \forall io = \{Edge, Face, Corner\} \\ \forall m = 1, 2, \dots, N_{io} \end{array} \right\}$$

$$Error_{m,cal,n}(\%) = 100 \cdot \left| \frac{EDH_{m,n} - H_{drop,tester,m}}{H_{drop,tester,m}} \right| \rightarrow \{ \forall m = 1, 2, \dots, N_{shocks} \}$$

Error of the Method n

$$Error_{cal\_io,n}(\%) = 100 \cdot \frac{\sum_{m=1}^{N_{shocks}} Error_{m,cal\_io,n}}{N_{shocks}} \rightarrow \text{taking into account the impact orientation}$$

$$Error_{cal,n}(\%) = 100 \cdot \frac{\sum_{m=1}^{N_{shocks}} Error_{m,cal,n}}{N_{shocks}}$$

Error of the Method n for each group of drop height tested

$$Error_{cal\_io,H_{drop,tester},n}(\%) = 100 \cdot \frac{\sum_{m=1}^{N_{H_{drop,tester}}} Error_{m,cal\_io,n}}{N_{H_{drop,tester}}} \rightarrow \text{taking into account the impact orientation}$$

$$Error_{cal,H_{drop,tester},n}(\%) = 100 \cdot \frac{\sum_{m=1}^{N_{H_{drop,tester}}} Error_{m,cal,n}}{N_{H_{drop,tester}}}$$

Figura 5.12. Definición de los errores en el cálculo de la EDH

En los métodos 1 y 2 se ha introducido un coeficiente (c), para corregir la asunción de que la velocidad del impacto sucede cuando la aceleración es máxima (figura 5.13), lo que en general no es cierto. En los métodos 3 y 4 se usa el coeficiente de restitución (e), para calibrar el embalaje de ensayo. Además en los métodos 5 y 6 se ha introducido otro coeficiente (c), para corregir la asunción de que la aceleración del choque o pulso varía de modo semi-senoidal con el tiempo. En estas calibraciones se asume que la superficie de impacto es una superficie dura comparada con la de un material de amortiguación.

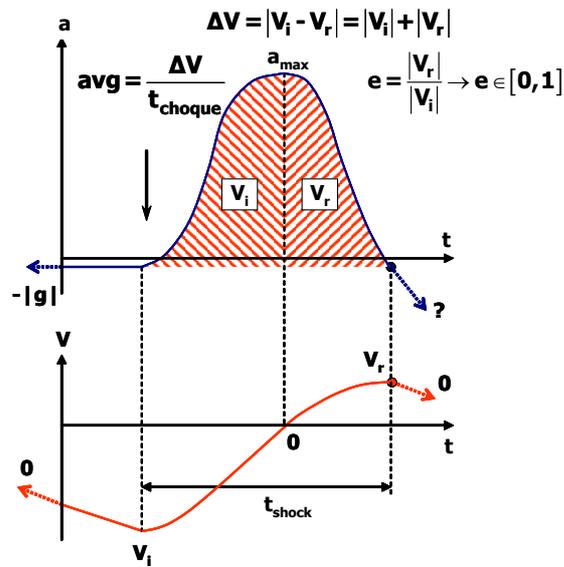


Figura 5.13. Aceleración versus velocidad de impacto producido en una caída libre

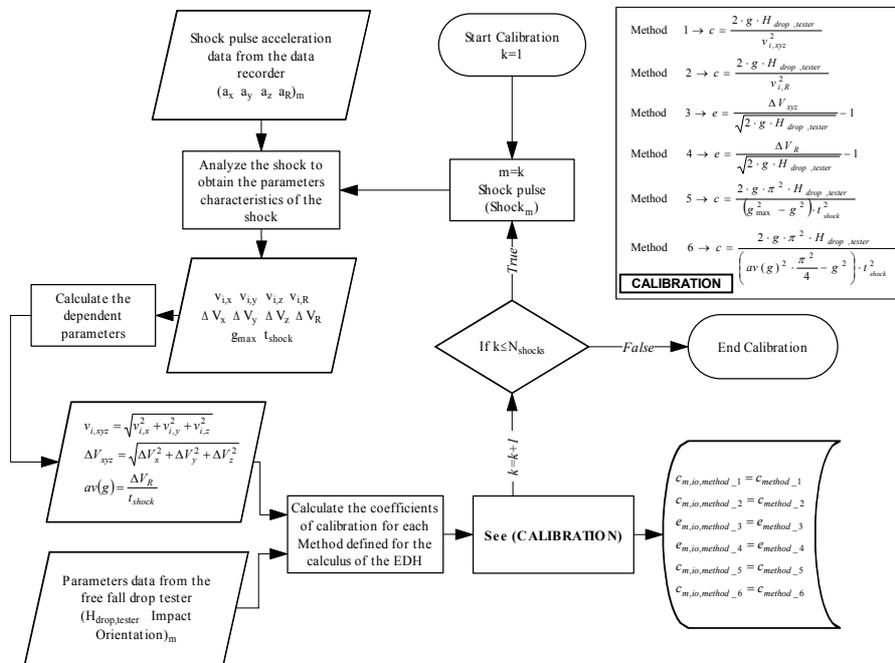


Figura 5.14. Algoritmo para la calibración de la EDH

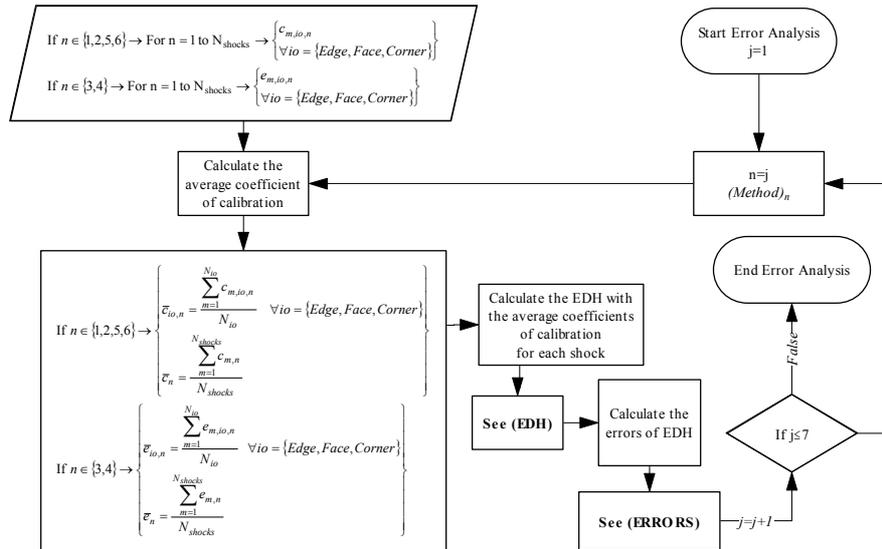


Figura 5.15. Algoritmo para el cálculo de los errores

Para cada caída realizada en la máquina de caída vertical se realizaron los siguientes cálculos:

- Los parámetros característicos del choque o pulso
- Los coeficientes de calibración y/o restitución (c) y (e)

Por cada método a analizar se realizaron los siguientes cálculos:

- Los coeficientes medios de calibración y/o restitución (c) y (e) de las 72 caídas
- Los coeficientes medios de calibración y/o restitución (c) y (e) para cada grupo de orientación de impacto (arista, cara, esquina)
- La altura de caída efectiva EDH aplicando los coeficientes medios de calibración y/o restitución (c) y (e)
- Los errores de las estimaciones de la EDH sin tener en cuenta la orientación del impacto en la calibración
- Los errores de las estimaciones de la EDH teniendo en cuenta la orientación del impacto en la calibración

### 5.4. ARTÍCULO 4. Monitorizando la evolución de la fatiga en embalajes de cartón ondulado sometidos a cargas dinámicas de compresión aleatorias.

El experimento que se describe a continuación se diseñó para contrastar las hipótesis, tanto de trabajo como principal que engloba el presente artículo, que el daño acumulado en embalajes de cartón ondulado sometidos continuamente a cargas de compresión dinámicas aleatorias puede ser medido y detectado mediante la evaluación de los parámetros modales del sistema (rigidez dinámica y amortiguamiento viscoso) extraídos de la función de respuesta en frecuencia (FRF) del sistema (figura 5.16)

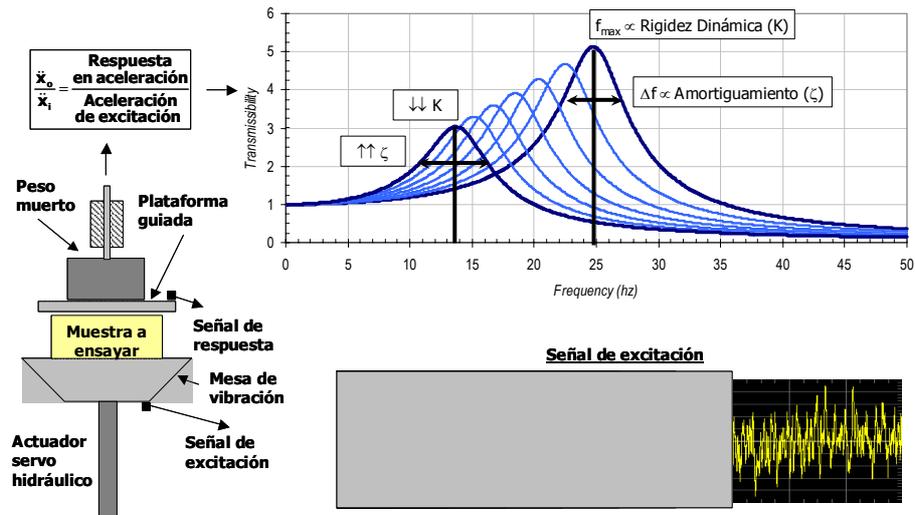


Figura 5.16. Esquema ejemplo de hipótesis a contrastar en este artículo

La técnica para la extracción de los parámetros modales aplicada en este artículo se describe a continuación:

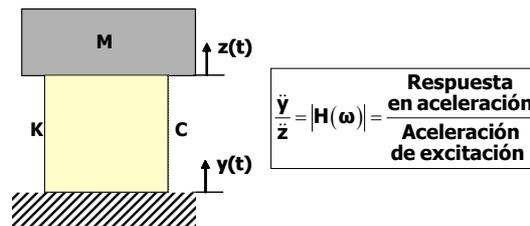


Figura 5.17. Modelo de un sistema de un grado de libertad

**Ec. movimiento de un sistema de un grado de libertad**

$$M \cdot \ddot{z} + C \cdot \dot{z} + K \cdot z = K \cdot y + C \cdot \dot{y}$$

**Calculando la función de respuesta en frecuencia (FRF)**

$$y = e^{i\omega t} \rightarrow \dot{y} = i\omega \cdot e^{i\omega t}$$

$$z = H(\omega) \cdot e^{i\omega t} \rightarrow \dot{z} = i\omega \cdot H(\omega) \cdot e^{i\omega t} \rightarrow \ddot{z} = -\omega^2 \cdot H(\omega) \cdot e^{i\omega t}$$

$$H(\omega) = \frac{K + C \cdot i\omega}{K - M \cdot \omega^2 + C \cdot i\omega}$$

**FRF(M, K, C, ω)**

$$|H(\omega)| = \frac{[K^2 + (C \cdot \omega)^2]^{1/2}}{[(K - M \cdot \omega^2)^2 + (C \cdot \omega)^2]^{1/2}}$$

$$\text{Fase} = \text{ATAN} \left( \frac{C \cdot M \cdot \omega^3}{K \cdot (K - M \cdot \omega^2) + (C \cdot \omega)^2} \right)$$

**FRF(ζ, f/f<sub>n</sub>)**

$$C = 2M \cdot \zeta \cdot \omega_n$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{M}}$$

$$|H(f)| = \frac{[1 + (2\zeta \cdot \frac{f}{f_n})^2]^{1/2}}{[1 - (\frac{f}{f_n})^2]^2 + (2\zeta \cdot \frac{f}{f_n})^2]^{1/2}}$$

$$\text{Fase} = \text{ATAN} \left( \frac{2\zeta \cdot (\frac{f}{f_n})^3}{1 + (4\zeta^2 - 1) \cdot (\frac{f}{f_n})^2} \right)$$

**FRF(ζ, f/f<sub>max</sub>)**

$$\frac{d|H(f)|}{df} = 0 \rightarrow \frac{f_{\max}}{f_n} = \frac{\sqrt{8\zeta^2 + 1} - 1}{2\zeta} \rightarrow \frac{f}{f_n} = \frac{\sqrt{8\zeta^2 + 1} - 1}{2\zeta} \cdot \frac{f}{f_{\max}}$$

$$|H(f)| = \frac{[1 + [(\sqrt{8\zeta^2 + 1} - 1) \cdot \frac{f}{f_{\max}}]^{-2}]^{1/2}}{[1 - [(\frac{\sqrt{8\zeta^2 + 1} - 1}{2\zeta} \cdot \frac{f}{f_{\max}})^2]^2 + [(\sqrt{8\zeta^2 + 1} - 1) \cdot \frac{f}{f_{\max}}]^{-2}]^{1/2}}$$

$$\text{Fase} = \text{ATAN} \left( \frac{(\sqrt{8\zeta^2 + 1} - 1) \cdot \frac{f}{f_{\max}}^3}{(2\zeta)^2 + (4\zeta^2 - 1) \cdot (\sqrt{8\zeta^2 + 1} - 1) \cdot \frac{f}{f_{\max}}^2} \right)$$

### Obteniendo la rigidez dinámica, $K$ , y el amortiguamiento general, $\zeta$

1) Extraer los parámetros modales,  $f_{\max}$  y  $\zeta$  de la  $|FRF|$

a través de la aplicación del algoritmo de ajuste de mínimos cuadrados.

2) Calcular la rigidez dinámica,  $K$ , mediante la ecuación:

$$\frac{f_{\max}}{f_n} = \frac{\sqrt{8\zeta^2 + 1} - 1}{2\zeta}$$

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}}$$

$$\downarrow$$

$$K = (2\pi f_n)^2 \cdot M = \frac{(4\pi\zeta)^2 M}{\sqrt{8\zeta^2 + 1} - 1} f_{\max}^2$$

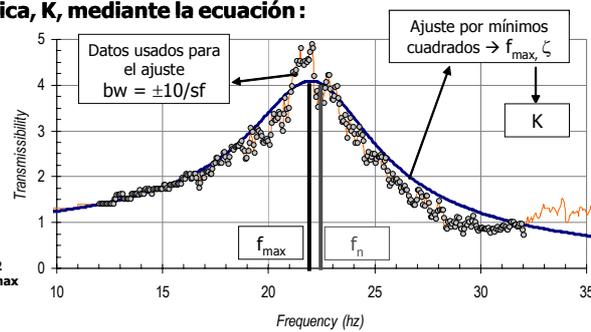


Figura 5.18. Técnica de extracción de parámetros modales y cálculo de la rigidez dinámica

Para ayudar a validar la hipótesis principal fue necesario la realización de una serie de experimentos exploratorios iniciales en los que la hipótesis de trabajo a contrastar era que la inducción de daño a embalajes de cartón ondulado por la aplicación de cargas estáticas de compresión de creciente magnitud es discernible mediante cambios en la frecuencia de resonancia del sistema.

Estos experimentos fueron también útiles para determinar las características de compresión de los embalajes de cartón ondulado, así como establecer parámetros óptimos para la evaluación de la función FRF del sistema. Los experimentos se realizaron utilizando una máquina de ensayo servo hidráulica capaz de realizar ensayos de compresión estáticos y dinámicos. Para los ensayos de compresión dinámica a la máquina se le proveyó de una plataforma plana guiada que permitió la aplicación de cargas libres colocadas sobre la muestra de embalaje de cartón ondulado, como se muestra en la figura 5.19.

Se establecieron 6 precargas de valor (0.5 kN, 1.0 kN, 1.25 kN, 1.4 kN, 1.5 kN y 1.6 kN). Tras la aplicación de cada una de las precargas a las que una muestra de cartón ondulado fue sometida, se obtenía la FRF de la muestra cargada con un peso muerto guiado de 150N como se muestra en la figura 5.19. A dicho sistema de un solo grado de libertad se le sometía a excitación de la base aplicando un bajo nivel (1 m/s<sup>2</sup> RMS) de señal aleatoria Gaussiana (2-100 Hz), sintetizada por un controlador de

vibración aleatoria, con el fin de no provocar más daños en la muestra. Tanto la mesa como la plataforma con la carga libre estaban provistas de acelerómetros conectados a un analizador de espectros en tiempo real.

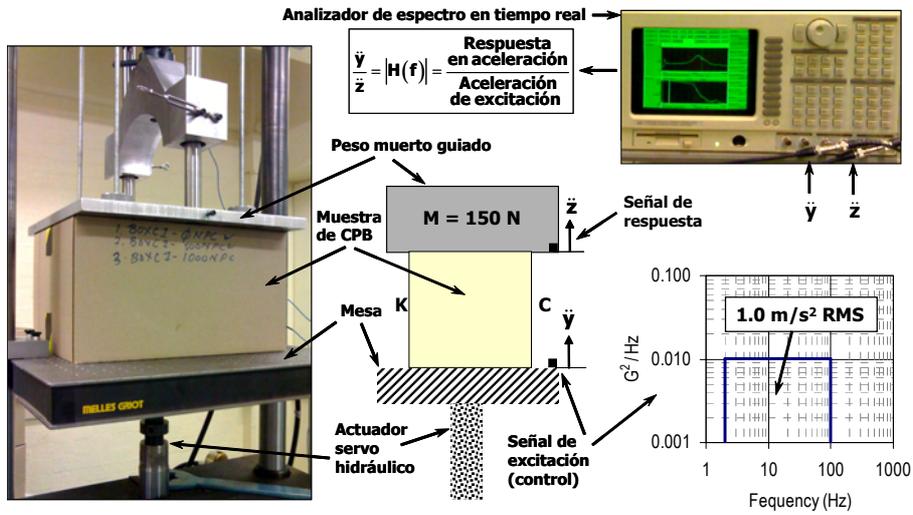


Figura 5.19. Preparación de los ensayos exploratorios iniciales

La rigidez dinámica de la muestra,  $K_d$ , para cada nivel de compresión, se calculó utilizando la técnica de extracción de los parámetros modales,  $f_d$  y  $\zeta$ , extraídos de la magnitud de la FRF mediante el algoritmo de ajuste de mínimos cuadrados anteriormente descrito (figura 5.18). La figura 5.21 muestra un ejemplo de una FRF analizada con dicho algoritmo.

La rigidez dinámica para cada muestra precomprimida se comparó con la rigidez estática obtenida de la tangente en el punto de 150N de la curva fuerza-deformación (figura 5.20).

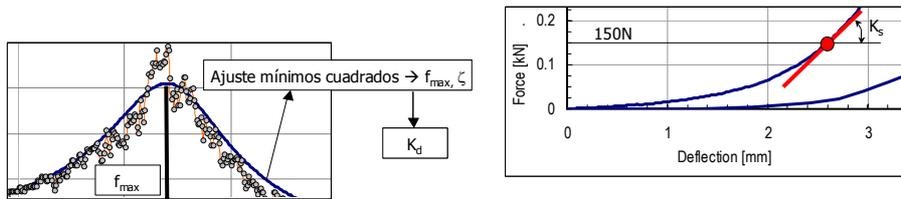


Figura 5.20. Preparación de los ensayos exploratorios iniciales

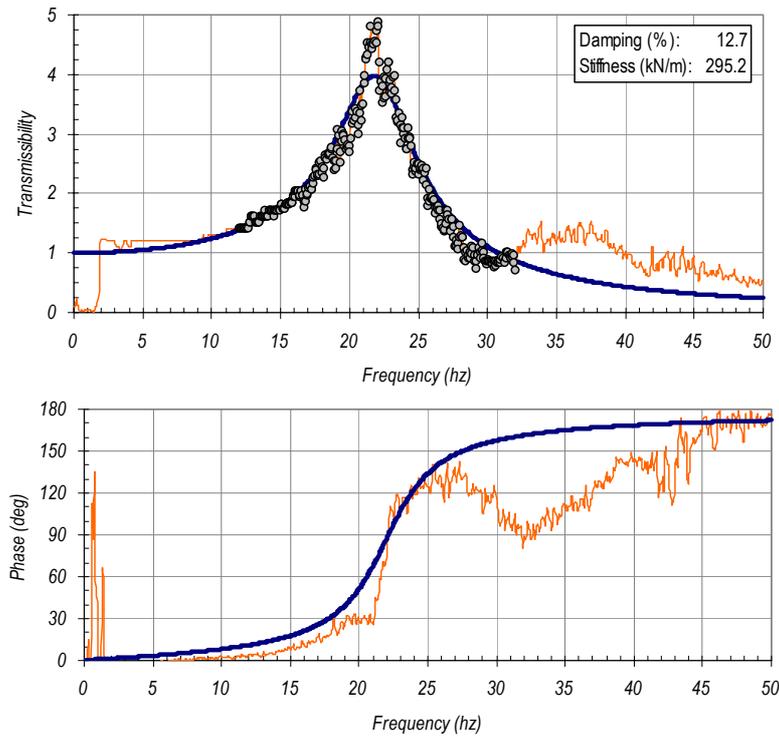


Figura 5.21. Ejemplo de una FRF analizada con ajuste de mínimos cuadrados

Una segunda serie de experimentos se diseñó para evaluar la efectividad del método de extracción de parámetros modales en la determinación del nivel de daño acumulado de embalajes de cartón ondulado sujetos a cargas de compresión dinámica aleatoria. La plataforma guiada se cargó con 916N, como puede verse en la figura 5.22, mientras que la mesa fue sometida a una señal aleatoria Gaussiana de ancho de banda limitado (2-100 Hz), sintetizada por un controlador de vibración aleatoria de bucle cerrado. El nivel de vibración RMS se estableció en  $2.5 \text{ m/s}^2$  con el fin de reducir el posible efecto de rebote para evitar efectos no lineales. A la mesa y a la plataforma guiada se le implantaron acelerómetros conectados a un analizador de espectros de tiempo real programado para calcular la FRF media de 100 sub-grabaciones con un 90% de solapamiento a intervalos regulares. Los primeros 10 minutos de cada ensayo se utilizaron para permitir que la muestra se estabilizase. Se obtuvo la rigidez dinámica y el damping del sistema en varias etapas a partir de la FRF media, aplicando los mismos algoritmos de extracción que los utilizados en las primeras series de experimentos.

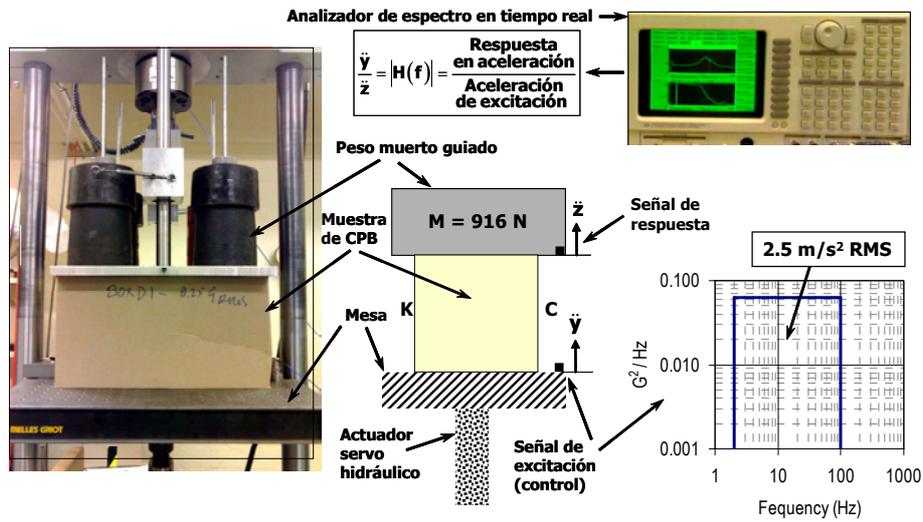


Figura 5.22. Preparación de los ensayos finales

Para cada nivel de compresión correspondiente a los ensayos preliminares iniciales se realizaron los siguientes cálculos:

- Rigidez dinámica de la muestra,  $K_d$ , utilizando la técnica de extracción de los parámetros modales,  $f_d$  y  $\zeta$ , extraídos de la magnitud de la FRF mediante el algoritmo de ajuste de mínimos cuadrados
- Rigidez estática obtenida de la tangente en el punto de 150N de la curva fuerza-deformación
- Correlación entre la rigidez dinámica y la rigidez estática relativas

Para cada muestra de embalaje de ensayo utilizado en los ensayos finales se realizaron los siguientes cálculos:

- Rigidez dinámica de la muestra,  $K_d$ , y amortiguamiento viscoso,  $\zeta$ , utilizando la técnica de extracción de los parámetros modales,  $f_d$  y  $\zeta$ , extraídos de la magnitud de la FRF mediante el algoritmo de ajuste de mínimos cuadrados, cada 10 minutos
- Rigidez dinámica relativa versus tiempo de ensayo
- Amortiguamiento viscoso relativo versus tiempo de ensayo

### 5.5. ARTÍCULO 5. Nuevo modelo de distribución estadística de las vibraciones aleatorias generadas por vehículos en carretera.

El experimento que se describe a continuación se diseñó para contrastar las hipótesis, tanto de trabajo como principal que engloba el presente artículo, que el nuevo modelo de distribución estadística de cuatro parámetros desarrollado a partir de la distribución de Weibull de tres parámetros, describe de una forma más precisa que el actual el carácter estadístico de las vibraciones aleatorias RMS generadas por vehículos en carretera.

Una aproximación elemental para caracterizar procesos no-estacionarios es calcular la RMS (raíz cuadrada del valor medio) de un registro de vibración a lo largo de pequeños segmentos. La longitud de los segmentos y el paso incremental para el cálculo de la RMS desplazada (ecuación 5.5) es crítico para el análisis.

$$\hat{x}_i(t) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=i}^{i+w} x^2(j)} \quad \text{para } i = 0, \delta, 2\delta, 3\delta, \dots, N\delta \quad (5.5)$$

donde  $w$  es la longitud del segmento,  $\delta$  es el paso incremental y  $N$  es el número total de segmentos en el registro vibratorio.

Los modelos estadísticos generalmente utilizados hasta la fecha para caracterizar procesos aleatorios son los que se muestran a continuación:

#### Rayleigh

$$P(x) = \frac{x}{\sigma^2} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{\sigma}\right)^2} \quad \forall x \in [0, +\infty[$$

#### Rayleigh modificado por V. Rouillard

$$P(x) = \frac{x}{(\beta\sigma)^2} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{\beta\sigma}\right)^\alpha} \quad \forall x \in [0, +\infty[$$

#### Dos parámetros Weibull

$$P(x) = \frac{\gamma}{\alpha} \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\gamma-1} \cdot e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\gamma} \quad \forall x \in [0, +\infty[$$

#### Tres parámetros Weibull

$$P(x) = \frac{\gamma}{\alpha} \left(\frac{x-x_0}{\alpha}\right)^{\gamma-1} \cdot e^{-\left(\frac{x-x_0}{\alpha}\right)^\gamma} \quad \forall x \geq x_0$$

De todos los modelos estadísticos utilizados para caracterizar procesos aleatorios, el de tres parámetros de Weibull (ecuación 5.6) puede ser considerado el más versátil hasta la fecha.

$$f(x) = \frac{\gamma}{\alpha} \left( \frac{x-x_0}{\alpha} \right)^{\gamma-1} \cdot e^{-\left( \frac{x-x_0}{\alpha} \right)^\gamma} \quad \forall \begin{cases} x \in [x_0, +\infty[ \\ \alpha, \gamma \in \mathbb{R}^+ \\ x_0 \in \mathbb{R} \end{cases} \quad (5.6)$$

La distribución de tres parámetros de Weibull puede ser utilizada para reproducir un amplio rango de distribuciones estándar (Rayleigh, Rayleigh modificada, Gumbel, dos parámetros de Weibull), pero sin embargo, en muchos casos incluso esta potente distribución no puede caracterizar procesos aleatorios que exhiben fuertes rasgos no-estacionarios.

Un nuevo modelo de distribución estadística, a partir de la distribución de tres parámetros de Weibull, fue desarrollado para ser aplicado en este artículo. Se substituyó el exponente de la función exponencial,  $\gamma$ , de la ecuación 5.6 por un nuevo parámetro  $\beta$ , que permitía el control de la pendiente de la cola derecha de la distribución e incrementaba el rango del modelo para caracterizar un mayor número de distribuciones estadísticas. En muchos casos, los procesos aleatorios existen con límites que no son necesariamente restringidos a cero e  $\infty$ . Para acomodar dichos casos, en el nuevo modelo se incluyó un parámetro de límite de dominio  $x_i$ , el cual define el límite inferior del dominio de la función de distribución. Adicionalmente, la función valor absoluto fue introducida en el modelo para permitir la caracterización de distribuciones inversas y simétricas con los ejes de simetría en  $x = x_0$  cuando  $x_i = -\infty$ , así permitiendo a  $\gamma$  y  $\beta$  poder ser negativos. Con estas modificaciones aplicadas al modelo de tres parámetros de Weibull, la función de densidad de probabilidad de una variable  $x$ , con el nuevo modelo desarrollado, viene expresada en la ecuación siguiente:

$$f(x) = \rho \cdot \left( \frac{|x-x_0|}{\alpha} \right)^{\gamma-1} \cdot e^{-\left( \frac{|x-x_0|}{\alpha} \right)^\beta} \quad (5.7)$$

where

$$\rho = \frac{2|\beta| \cdot |\beta|}{(\delta_{x_i}^{-\infty} + 1) \cdot \alpha \cdot \left( (|\beta| \cdot (\delta_{x_i}^{-\infty} + 1) + \beta \cdot (\delta_{x_i}^{-\infty} - 1)) \cdot \Gamma\left[\frac{\gamma}{\beta}\right] + 2\beta \cdot (1 - \delta_{x_i}^{-\infty}) \cdot \Gamma\left[\frac{\gamma}{\beta}, \left(\frac{x_i - x_0}{\alpha}\right)^\beta\right] \right)}$$

$$\forall \begin{cases} x \in [-\infty \vee (x_i // x_i \geq x_0), +\infty[ \\ \alpha \in \mathbb{R}^+ \\ \beta, \gamma \in \mathbb{R} \setminus \{0\} \\ x_0 \in \mathbb{R} \\ x_i \in \mathbb{R} \cup -\infty \\ \text{sign}(\beta) = \text{sign}(\gamma) \end{cases}$$

siendo  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  y  $x_0$  los parámetros empíricos del modelo,  $x_i$  el límite inferior del dominio del proceso,  $\rho$  el factor de escala para la función normalizada, las funciones  $\Gamma$ , las conocidas como funciones gamma completa (ecuación 5.8) e incompleta superior (ecuación 5.9) y  $\delta$ , la delta de Kronecker.

$$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} t^{z-1} \cdot e^{-t} dt \quad \forall \begin{cases} t \in [0, +\infty[ \\ z \in \mathbb{R}^+ \cup 0 \end{cases} \quad (5.8)$$

$$\Gamma(z, y) = \int_y^{\infty} t^{z-1} \cdot e^{-t} dt \quad \forall \begin{cases} t \in [0, +\infty[ \\ z, y \in \mathbb{R}^+ \cup 0 \end{cases} \quad (5.9)$$

Para el caso de la RMS desplazada de vibraciones producidas por vehículos en carretera,  $x_p$  siempre será mayor de cero puesto que la señal temporal RMS siempre es positiva (figura 5.23). Para descontar el efecto de las vibraciones residuales sostenidas de bajo nivel que no son causadas por interacciones del vehículo con la carretera,  $x_i = x_0$ . De esta forma, el nuevo modelo para caracterizar la distribución de densidad de probabilidad de la RMS desplazada de vibraciones producidas por vehículos en carretera, puede simplificarse en la expresión siguiente:

$$P(x) = \begin{cases} 0 & \forall x \in ]-\infty, x_0[ \\ \frac{\beta}{\alpha \cdot \Gamma[\frac{\gamma}{\beta}, 0]} \left(\frac{x-x_0}{\alpha}\right)^{\gamma-1} \cdot e^{-\left(\frac{x-x_0}{\alpha}\right)^\beta} & \forall x \in [x_0, +\infty[ \end{cases} \quad \forall \begin{cases} \alpha, \beta, \gamma \in \mathbb{R}^+ \\ x_0 \in \mathbb{R} \end{cases} \quad (5.10)$$

donde  $x$  es la RMS desplazada,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  y  $x_0$  los parámetros empíricos del modelo.

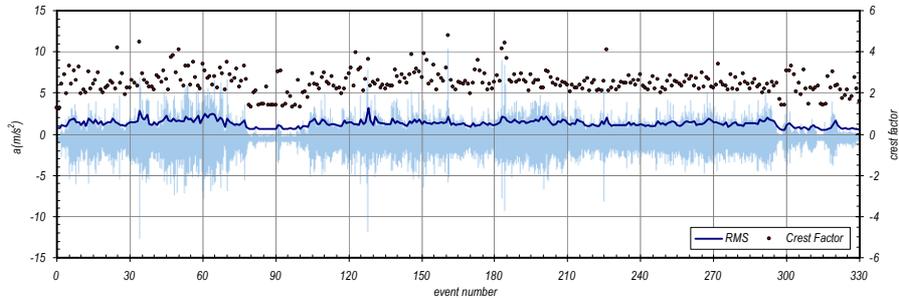


Figura 5.23. Ejemplo de señal temporal y de la función RMS desplazada de un registro

Los parámetros estadísticos del modelo simplificado, para el caso de las vibraciones producidas por vehículos en carretera, la media  $\mu$ , la mediana  $mdn$ , la desviación estándar  $\sigma$ , la skewness  $\nu$  (Sk) y la kurtosis  $Kt$ , fueron deducidos:

$$\mu = x_0 + \alpha \cdot \Psi^{[1]} \quad (5.11)$$

$$\Gamma\left[\frac{\gamma}{\beta}\right] - \Gamma\left[\frac{\gamma}{\beta}, \left(\frac{mdn}{\alpha}\right)^\beta\right] = 1/2 \quad (5.12)$$

$$\sigma = \sqrt{E(x^2) - \mu^2} \quad (5.13)$$

$$\text{donde } E(x^2) = \alpha^2 \cdot \Psi^{[2]} + 2x_0\mu - x_0^2$$

$$\nu = Sk = \frac{1}{\sigma^3} \left[ E(x^3) - 3\mu \cdot E(x^2) - 2\mu^3 \right] \quad (5.14)$$

$$\text{donde } E(x^3) = \alpha^3 \Psi^{[3]} + 3x_0\alpha^2 \Psi^{[2]} + 3x_0^2\mu - 2x_0^3$$

$$Kt = \frac{1}{\sigma^4} \left[ E(x^4) - 4\mu \cdot E(x^3) + 6\mu^2 \cdot E(x^2) - 3\mu^4 \right] \quad (5.15)$$

$$\text{donde } E(x^4) = \alpha^4 \Psi^{[4]} + 4x_0\alpha^3 \Psi^{[3]} + 6x_0^2\alpha^2 \Psi^{[2]} + 4x_0^3\mu - 3x_0^4,$$

$$\text{and } \Psi^{[j]} = \frac{\Gamma\left[\frac{\gamma+j}{\beta}\right]}{\Gamma\left[\frac{\gamma}{\beta}\right]}$$

Para validar el nuevo método propuesto, 13 registros vibratorios, fueron obtenidos de un amplio rango de vehículos, rutas suspensiones y cargas. En la tabla 5.1 se muestran las características de los 13 registros vibratorios. Los registros de vibración fueron obtenidos utilizando registradores de vibraciones de Lasmont Corporation.

Los registradores de vibraciones fueron configurados:

- Datos de eventos de tiempo:
  - Tiempo de grabación de cada evento: 8000 ms
  - Frecuencia de muestreo,  $f_s$ : 1024 hz
  - Tiempo de muestreo: de 9 s a 60 s

La historia temporal RMS de cada registro (figura 5.23) fue calculada aplicando la ecuación 5.5 con una longitud de segmento,  $w$ , de 8 segundos y sin solapamiento ( $\delta = w + 1/f_s$ ).

<i>Record ID</i>	<i>Vehicle type &amp; load</i>	<i>Country</i>	<i>Route Type</i>
DATA A	Utility vehicle (1 Tonne cap.). Load: < 5% cap.	Australia	Suburban streets
DATA B	Prime mover + Semi trailer (Air ride susp.). Load: 90% cap.	Australia	Country roads
DATA C	Transport van (700 kg cap.). Load: 60% cap.	Australia	Suburban streets
DATA D	Transport van (700 kg cap.). Load: 60% cap.	Australia	Main suburban hwy
DATA E	Transport van (700 kg cap.). Load: 60% cap.	Australia	Motorway
DATA F	Prime mover + Semi trailer (Leaf spring susp.). Load: < 5% cap.	Australia	Country roads
DATA G	Tipper truck (16 Tonnes cap., Air ride susp.). Load: 25% capacity.	Australia	Country roads
DATA H	Small flat bet truck (1 Tonne cap., Leaf spring susp.). Load <5% cap.	Australia	Suburban streets
DATA J	Flat bed truck (5 Tonnes cap., Leaf spring susp.). Load >95% cap.	Australia	Country roads
DATA K	Sedan car. Load: 1 passenger	Australia	Suburban streets
DATA L	Prime mover + Semi trailer (Air ride susp.). Load: 60% cap.	Spain	Motorway
DATA M	Prime mover + Semi trailer (Air ride susp.). Load: 20% cap.	Spain	Motorway
DATA N	Prime mover + Semi trailer (Leaf spring susp.). Load: 10% cap.	Spain	Motorway
DATA O	Prime mover + Semi trailer (Leaf spring susp.). Load: < 1% cap.	Spain	Motorway

Tabla 5.1. Características de los 13 registros de vibración obtenidos

Un programa de ordenador (codificado en Matlab®, figura 5.24) fue desarrollado para:

- Determinar los valores óptimos de los parámetros del modelo que consiguen el mejor ajuste de la función de densidad de probabilidad de la RMS con respecto a los 13 registros de vibración obtenidos.
- Mejorar los resultados inestables producidos por el método de ajuste de mínimos cuadrados.

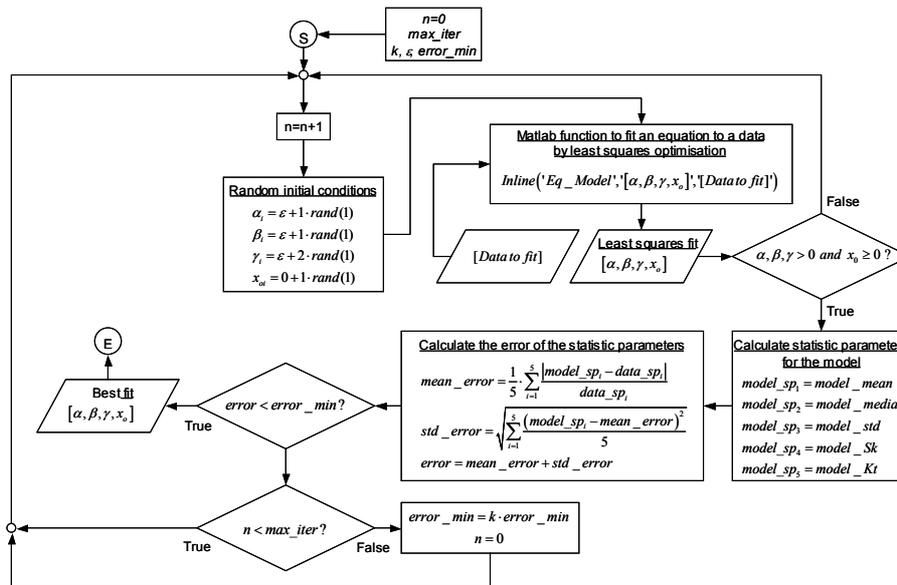


Figura 5.24. Algoritmo para la optimización del ajuste

Para demostrar la potencia de la nueva distribución estadística en reproducir un abanico amplio de distribuciones estadísticas conocidas, los siguientes gráficos fueron realizados:

- Gráfico compuesto del modelo que muestra la influencia de cada uno de los parámetros en una distribución estadística no-simétrica ( $x_i \neq -\infty$  y  $x_i \geq x_0$ ).
- Gráfico compuesto del modelo que muestra la influencia de cada uno de los parámetros en una distribución estadística simétrica ( $x_i = -\infty$ ).

Para cada RMS desplazada procesada de los registros vibratorios, se realizaron los siguientes cálculos:

- Ajuste por mínimos cuadrados, aplicando el algoritmo de la figura 5.24, con el nuevo modelo propuesto y con el modelo de 3 parámetros de Weibull
- Comparación de la bondad del ajuste de la distribución estadística, con el nuevo modelo propuesto y con el modelo de 3 parámetros de Weibull, para cada uno de los parámetros estadísticos, media, mediana, desviación estándar, skewness y kurtosis

- Correlación dos a dos de los parámetros del nuevo modelo propuesto para demostrar su independencia.

### 5.6. ARTÍCULO 6. Efecto de la compresión inicial en material de amortiguamiento de cartón ondulado en las características de atenuación ante repetitivos impactos.

El experimento que se describe a continuación se diseñó para contrastar las hipótesis, tanto de trabajo como principal que engloba el presente artículo, que un material de amortiguamiento basado en el papel puede ser utilizado para comportarse de manera similar ante múltiples impactos que otros materiales de amortiguamiento basados en el petróleo.

La figura 5.25 muestra esquemáticamente el diseño del experimento llevado a cabo en este artículo.

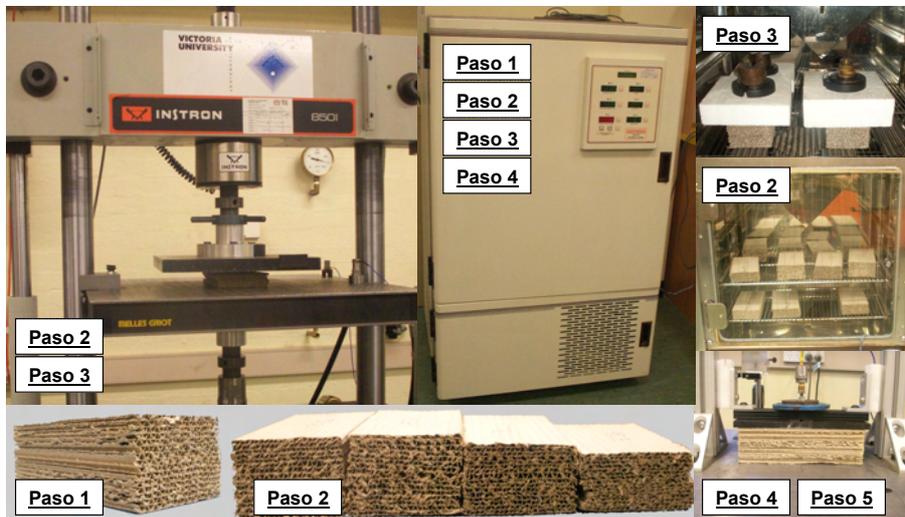


Figura 5.25. Esquema del experimento y metodología empleada

En el primer paso, 8 muestras de amortiguamiento de 197x98x70mm fabricadas mediante 15 capas de cartón ondulado Corrupad®, fueron introducidas en una cámara climática durante 48 horas a 23°C y 50%Hr, para precondicionamiento. En el segundo paso, las mismas ocho muestras de cartón ondulado fueron extraídas de la cámara climática y fueron sometidas a precompresión dinámica para producir dos muestras de material de amortiguamiento con una deformación inicial del 50%,

65%, 80% y 95%. Tras la precompresión, las muestras de amortiguamiento fueron introducidas en la cámara climática durante 48 horas más. En el tercer paso, cuatro muestras de material de amortiguamiento con diferente deformación inicial fueron extraídas de la cámara climática y sometidas a compresión dinámica hasta la máxima deformación posible, a una velocidad de 250 mm/s para obtener las características dinámicas necesarias para el cálculo de las curvas de amortiguamiento utilizando el método de mínimos cuadrados iterativo desarrollado por (Sek et al, 2000). Tras la determinación del tensión estática óptima para cada deformación inicial, las restantes cuatro muestras de material de amortiguamiento fueron introducidas en la cámara climática y sometidas en su interior a una carga equivalente a esas cargas estáticas óptimas, para así simular el peso de un producto y las condiciones de almacenamiento. Las muestras estuvieron en la cámara climática durante 48 horas más antes de comenzar el siguiente paso.

En el cuarto paso, cada muestra precomprimida de cartón ondulado fue sometida a impactos repetitivos desde una altura de 60 cm, en una máquina de ensayos de materiales de amortiguamiento. Cada muestra fue sometida a 20 impactos realizados a intervalos de 1 minuto. Los pulsos sin filtrar procedentes de cada uno de los impactos, fueron registrados por un acelerómetro y guardados para un posterior análisis. Otra vez, las muestras fueron almacenadas en la cámara climática durante 96 horas más. En el quinto paso estas muestras fueron sometidas a otros 15 impactos consecutivos realizados a intervalos de 1 minuto. Los pulsos sin filtrar también fueron almacenados para un posterior análisis.

Las compresiones dinámicas fueron realizadas en una máquina de ensayo Instron 8501 y los impactos repetitivos en una máquina de ensayos de materiales de amortiguamiento, como se muestra en la figura 5.25.

Para cada uno de los impactos realizados sobre las muestras precomprimidas a diferentes niveles de deformación inicial, se calculó la amplificación del espectro de respuesta en frecuencia (SRS) suponiendo un elemento crítico hipotético con un amortiguamiento viscoso de 0.05. El elemento crítico fue modelado como un sistema lineal de segundo orden cuya función de transferencia viene dada por la ecuación siguiente:

$$H(s) = \frac{2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad \text{donde } \omega_n = 2\pi f \quad (5.16)$$

Para cada una de las deformaciones iniciales, se obtuvieron:

- La curva de tensión versus deformación resultante del ensayo de compresión dinámica a una velocidad de ensayo de 250 mm/s
- La curva de amortiguamiento aceleración máxima versus tensión estática utilizando el método de mínimos cuadrados iterativo desarrollado por (Sek et al, 2000)

Para cada una de las series de impactos repetitivos a cada una de las deformaciones iniciales, se obtuvieron:

- La tendencia de la aceleración máxima tras los repetitivos impactos modelada por la ecuación siguiente, donde  $n$  es el número del impacto y  $a_{\max,1}$  es la aceleración máxima del primer impacto de la serie:

$$a_{\max,n} = \ln(n) + a_{\max,1} \quad (5.17)$$

- Un mapa de los pulsos donde se representa el número de impacto versus la aceleración en cada instante de tiempo.
- Un mapa de espectros de respuesta en frecuencia donde se representa el número de impacto versus la amplificación de la respuesta (SRS) para cada una de las frecuencias desde 0 a 1000 hz.

También se obtuvo un gráfico que muestra la tendencia de la aceleración máxima versus el número de impactos realizados, para cada una de las muestras sometidas a diferentes deformaciones iniciales.



# 6 RESUMEN DE LAS PUBLICACIONES

---

Los objetivos e hipótesis de la presente tesis doctoral, justificados y detallados en los apartados anteriores, han sido desarrollados en diferentes trabajos de investigación que han dado lugar a las publicaciones incluidas en el compendio que se adjunta (Anexo). En dichas publicaciones se detallan los experimentos y resultados particulares de cada una de las investigaciones parciales que conforman la tesis doctoral. Como ya se expuso en la justificación de la unidad temática, dichas investigaciones se enfocan en profundizar en la generación de nuevo conocimiento dentro del campo de la ingeniería del embalaje y mejorar las técnicas actuales de simulación de los riesgos transmitidos al producto y su embalaje en los procesos de transporte y distribución. El énfasis se ha puesto en investigar el nivel y la naturaleza del abuso mecánico aplicado al producto embalado durante el proceso de transporte y distribución (en los cuales los impactos, las vibraciones producidas por el vehículo y las compresiones dinámicas son los más importantes), la precisión de los métodos de estimación de la altura equivalente a impactos obtenidos en el entorno de distribución, metodologías para simular en el laboratorio el proceso de transporte y distribución de la forma más realista posible y el comportamiento de

materiales de amortiguamiento más respetuosos con el medio ambiente ante impactos repetitivos. Los artículos se resumen a continuación.

### **6.1. ARTÍCULO 1. Medida y análisis del entorno de distribución aéreo de mercancías enviadas mediante DHL y FedEx entre Europa y USA.**

La industria del envío de paquetes es uno de los sectores del transporte y la logística más crecientes tanto en América como en Europa. De ahí que sea importante comprender los movimientos físicos que las mercancías embaladas realizan en este entorno de distribución que incluye diversos modos de transporte desde el fabricante hasta el consumidor. Desde que las mercancías embaladas son enviadas utilizando varios medios de transporte, ha habido un esfuerzo creciente en medir y analizar los eventos dinámicos que los productos embalados deben soportar en un determinado entorno de distribución.

Diversos estudios han sido llevados a cabo en los últimos años para determinar el comportamiento dinámico que productos embalados (paquetes unitarios) soportaban durante su distribución como función del tamaño del paquete, su peso, tamaño y empresa transportista o de paquetería. Normalmente, estos estudios previos se han enfocado en la medida y análisis de los entornos de distribución regionales y domésticos dentro de Europa y de USA Sin embargo no existe información disponible para determinar el entorno de distribución y manutención internacional de envíos de paquetes individuales entre dos continentes. Este estudio ha utilizado paquetes instrumentalizados con acelerómetros tri-axiales. Los impactos obtenidos han sido analizados para determinar los niveles de cambio total de velocidad en función de los eventos medidos en el entorno de distribución para que sirviera de desarrollo de datos de altura de caída para el uso en laboratorio de ensayos de embalajes. Este estudio además proporciona una comparación entre DHL y FedEx, las dos compañías más importantes en el envío internacional de paquetes, no presentando diferencias apreciables en la severidad de su entorno. Donde sí presentó diferencias fue cuando se comparó con el entorno de distribución nacional de USA, siendo este último más severo que el entorno de distribución internacional analizado en el presente estudio.

Otra aportación del presente estudio fue la de comprobar que la utilización de etiquetas de aviso de producto frágil en los embalajes no

reducía considerablemente el número de impactos y de altura de caída máxima esperada en los envíos internacionales por vía aérea entre USA y España por las compañías DHL y FedEx.

## **6.2. ARTÍCULO 2. Medida y análisis de los niveles de vibración que se transmite a la mercancía en el transporte por carretera en España en función de la carga, el tipo de suspensión y la velocidad del vehículo.**

Los niveles de vibración que aparecen durante el proceso del transporte en vehículos son complejos y juegan un importante papel en el nivel de daño experimentado por los productos cuando éstos son enviados. En la pasada década la tecnología permitió a los ingenieros de embalaje medir y analizar los niveles de vibración en transportes comerciales. Estudios recientes están obteniendo medidas de vibración a lo largo de todo el mundo lo cual está permitiendo a los ingenieros de embalaje desarrollar embalajes óptimos y que soporten el entorno de distribución al que van a verse sometidos.

La síntesis precisa de vibraciones producidas por vehículos en carretera requiere que el proceso sea profundamente estudiado, y a su vez, cuente con una medida lo más exacta posible. Igualmente, el procedimiento de medida depende de la naturaleza y complejidad del proceso. Aunque las vibraciones verticales en vehículos pueden ser fácilmente medibles, la variabilidad del proceso y la falta de control de los parámetros medidos, hacen difícil, sino imposible, obtener registros que sean típicos de las vibraciones producidas por vehículos en todas las carreteras. Es necesario llevar a cabo un elevado número de registros de vibraciones, obtenidos bajo diversas condiciones, para obtener estimaciones estadísticas razonables.

El propósito de este estudio ha sido obtener niveles de vibración en el transporte de vehículos por carretera en España para desarrollar métodos más reales de simulación del transporte por carretera en laboratorio, en función de la carga, el tipo de suspensión y la velocidad del vehículo. Los vehículos fueron instrumentados con registradores de vibraciones para medir los niveles de vibración producidos durante el transporte y un sistema global de posicionamiento (GPS) para medir en todo momento la velocidad del vehículo. Dos vehículos diferentes, uno con suspensiones

mecánicas y el otro con suspensiones neumáticas, fueron utilizados en el estudio. Los trayectos se realizaron en dos configuraciones distintas de carga. La superficie de la carretera era asfalto. Los datos obtenidos fueron analizados y presentados en la forma de la función de Densidad Espectral de Potencia (PSD), la cual puede ser utilizada para la programación de mesas servo-hidráulicas de vibración utilizando los métodos de simulación de las normas ASTM, ISTA e ISO. En general los niveles de vibración obtenidos para ambos vehículos y ambas condiciones de carga fueron sensiblemente menores que los medidos en USA, China, India y el Sureste Asiático. También estos niveles de vibración obtenidos en el estudio fueron menores a los que las normas ASTM, ISTA e ISO recomiendan como procedimiento de ensayos para validación y desarrollo de embalajes.

Otras aportaciones del presente estudio, comparando los datos analizados en función de la velocidad del vehículo, fueron que mientras los niveles de vibración, RMS(G), y los niveles de vibración máxima, PEAK(G), se incrementaban al incrementarse la velocidad del vehículo, el factor de cresta definido como el cociente entre el valor máximo de excursión de las vibraciones producidas por vehículos en carretera y el valor RMS de las mismas, decrecía. Además debido a que la forma de la función PSD que determina las frecuencias predominantes en el espectro de vibraciones producidas por vehículos en carretera resultaba invariante ante el cambio de velocidad del vehículo era posible el desarrollar una función PSD escalable en función de la velocidad del vehículo.

### **6.3. ARTÍCULO 3. Interpretando los datos de impactos para la estimación de los niveles de altura de caída durante el entorno de distribución.**

Durante el proceso de distribución las mercancías sufren numerosos procesos de manutención, tanto automatizados como manuales. Estas operaciones provocan caídas e impactos de diversa naturaleza e intensidad que pueden provocar daños a los productos. Conocer estos impactos es el principal parámetro requerido para el diseño óptimo de los embalajes de protección. La severidad de los impactos a menudo se describe en función de su altura de caída-libre equivalente (EDH) y de la orientación del impacto, para así facilitar los ensayos de caída en laboratorio con máquinas especiales para tal fin. El enfoque generalmente utilizado es utilizar un paquete que contiene un registrador de aceleraciones y procesar los datos obtenidos para obtener una distribución estadística de las alturas de caída

esperadas en el proceso de distribución. El objeto de este estudio es establecer el algoritmo que estima del modo más preciso posible la altura de caída equivalente (EDH) a un impacto registrado por acelerómetros tri-axiales que habitualmente se obtienen en la caracterización de entornos de distribución. Para obtener una buena estimación de la altura efectiva de caída EDH es necesario estimar previamente mediante calibración el coeficiente de restitución entre el embalaje y la superficie de impacto. El estudio investiga diversos algoritmos para determinar la EDH. Para la estimación de la altura de caída se han estado utilizando tanto métodos basados en la obtención de la velocidad de impacto del embalaje, como métodos basados en el cambio total de velocidad durante el impacto. El problema de los basados en la velocidad del impacto radica en que no es posible determinar el momento exacto en el que sucede esa velocidad de impacto en el embalaje. El estudio presenta un análisis de los errores asociados con diversos métodos utilizados para estimar el cambio total de velocidad con los parámetros característicos del pulso del impacto tales como la duración del pulso, la máxima aceleración y su localización temporal.

Del estudio se obtuvo que los errores medios más bajos en la estimación de la EDH se conseguía con los métodos de cálculo basados en el uso del parámetro del cambio total de velocidad durante el impacto. Además producían menor variación en el coeficiente de restitución en el proceso de calibración. Los efectos de analizar los vectores de aceleración ortogonal separadamente y de utilizar el vector resultante han sido discutidos, obteniendo que para un error bajo en la estimación de la EDH no es necesario tener en cuenta la orientación del impacto producido en el proceso de calibración del coeficiente de restitución. El algoritmo utilizado para la estimación de la EDH y su calibración fue validado a través de la realización de una serie de experimentos de caída libre bajo condiciones controladas.

#### **6.4. ARTÍCULO 4. Monitorizando la evolución de la fatiga en embalajes de cartón ondulado sometidos a cargas dinámicas de compresión aleatorias.**

Durante el proceso transporte del ciclo de distribución, los sistemas de embalaje son sometidos a cargas de compresión dinámicas aleatorias que surgen de las vibraciones generadas por los vehículos. El nivel de severidad de estas cargas dinámicas de compresión es generalmente

función de los niveles de vibración, de la configuración y del peso del apilamiento. La capacidad que tiene un embalaje de cartón ondulado en soportar cargas dinámicas de compresión por periodos largos depende tanto de las características del material como del diseño del embalaje. La investigación está enfocada en demostrar la hipótesis de que el daño acumulado en embalajes de cartón ondulado sometidos continuamente a cargas de compresión dinámicas aleatorias resultará en una reducción en general de la rigidez como también un incremento en el amortiguamiento viscoso general del sistema. Esto se espera que sea manifestado, respectivamente, por un desplazamiento en la frecuencia fundamental de resonancia y en un incremento del ancho de banda de la función de respuesta en frecuencia del material en la resonancia cuando el sistema se asemeja a un sistema de un grado de libertad. El estudio presenta los resultados de unos experimentos preliminares en los cuales un número de muestras de cartón ondulado fueron sometidas a cargas de compresión dinámicas a través de una excitación aleatoria de la base de una mesa de vibración acoplada a un peso muerto guiado. El nivel de daño acumulado en la muestra fue continuamente evaluado mediante la monitorización de la rigidez y amortiguamiento viscoso general de la muestra, los cuales fueron extraídos de la función de respuesta en frecuencia (FRF) del sistema obtenida de medidas continuas de aceleración entre la mesa de vibración y el peso muerto guiado.

Además de que la evolución de la fatiga en el embalaje de cartón ondulado se manifestó por una ligera pendiente decreciente en los parámetros modales, otra aportación del presente estudio, fue que el inminente daño en el embalaje de cartón ondulado se manifestaba por un cambio brusco en las pendientes de los parámetros modales.

### **6.5. ARTÍCULO 5. Nuevo modelo de distribución estadística de las vibraciones aleatorias generadas por vehículos en carretera.**

Este artículo presenta los resultados iniciales de un estudio cuyo objetivo era la mejora del método por el cual las vibraciones producidas por vehículos en carretera eran caracterizadas y simuladas. Más concretamente, este estudio está enfocado en las vibraciones de cuerpo rígido producidas por los vehículos en carretera en el contexto de la distribución de mercancías embaladas. La investigación utiliza una gran variedad de datos de vibración, obtenidos de varias clases de vehículos y rutas tanto en España como en Australia, con registradores de vibraciones de alta

capacidad. Los vehículos utilizados van desde pequeños vehículos de transporte de mercancías hasta grandes camiones de plataforma con cabeza tractora, tanto con suspensiones mecánicas como neumáticas, tanto en carreteras urbanas, nacionales y autopistas. El estudio analiza además la principal limitación de utilizar el PSD como un solo descriptor de la vibraciones producidas por vehículos en carretera dado que los procesos aleatorios de vibración al ser simulados son asumidos normalmente-distribuidos (Gaussian) y estacionarios, lo cual no ocurre en las vibraciones producidas por vehículos en carretera. El estudio adopta un método alternativo basado en la distribución estadística de la raíz del valor medio al cuadrado (RMS) de eventos de la señal de vibración, como un indicador alternativo de la calidad general de las vibraciones producidas por vehículos en carretera. Los datos obtenidos fueron utilizados para calcular la distribución estadística de cada registro de vibración. La idoneidad de varios métodos matemáticos para describir la función de distribución de probabilidad (PDF) de los niveles RMS de vibración de vehículos en carretera, basados en la distribución Weibull y Rayleigh, fueron investigados.

El artículo propone un nuevo modelo de cuatro parámetros que describe de forma más precisa el carácter estadístico de las vibraciones aleatorias generadas por vehículos en carretera. Además de que la nueva distribución estadística de las vibraciones aleatorias generadas por vehículos en carretera reproduce las siguientes distribuciones conocidas (Rayleigh, Chi-Square, Exponencial, Gamma, Pearson tipo III, Weibull de dos y tres parámetros) describe de forma efectiva los parámetros estadísticos del proceso, la media, mediana, desviación estándar, skewness y kurtosis.

## **6.6. ARTÍCULO 6. Efecto de la compresión inicial en material de amortiguamiento de cartón ondulado en las características de atenuación ante repetitivos impactos.**

Debido al impacto negativo medioambiental de los materiales utilizados como amortiguamiento de productos embalados, tales como el poliestireno expandido, está habiendo un creciente interés en uno de los materiales más disponible y renovable, el papel, como sustituto. Varios estudios han sido llevados a cabo en los últimos años para investigar la capacidad del cartón ondulado para actuar como material de amortiguamiento de productos. Los estudios se han enfocado generalmente en las prestaciones de los materiales de amortiguamiento y

los efectos de las condiciones climáticas sobre la atenuación de la aceleración máxima en el primer impacto. Sin embargo no hay información disponible que demuestre que el cartón ondulado puede ser fabricado de tal forma que tenga un buen comportamiento ante atenuación de la aceleración máxima en repetitivos impactos.

Este estudio investiga la disminución de las características de atenuación de la aceleración máxima en materiales de amortiguamiento de cartón ondulado ante una serie de impactos consecutivos. Para la investigación se realizaron una serie de ensayos de amortiguamiento sobre materiales de amortiguamiento fabricados totalmente de cartón ondulado. Cada material de amortiguamiento fue sometido a un total de 35 impactos, dos series, una de 20 y otra de 15 impactos consecutivos con acondicionamiento climático entre medias. El efecto de la compresión inicial introducida en el proceso de fabricar el material de amortiguamiento es analizado y demostrado. Las prestaciones de los materiales de amortiguamiento fueron juzgadas no sólo con la aceleración máxima de los pulsos obtenidos. Todos los pulsos fueron registrados y los correspondientes espectros de respuesta en frecuencia fueron calculados y presentados como un mapa 3D que revelaba tendencias que ocurrían cuando el material de amortiguamiento era sometido a múltiples impactos. El estudio demuestra que el nivel de compresión inicial tiene un efecto importante en el grado de disminución de las prestaciones del material de amortiguamiento después de múltiples impactos. Como ejemplo, la máxima aceleración para un material de amortiguamiento de cartón ondulado comprimido previamente al 95% se incrementó tan solo un 20% entre el primer y el 35 impacto. Por el contrario para un material de amortiguamiento de cartón ondulado comprimido previamente al 80% el incremento fue del 300%. También se encontró que la selección de la tensión estática óptima debe de realizarse en conjunción con el número de impactos esperado para optimizar aun más las prestaciones del material de amortiguamiento.

# 7

## RESULTADOS

---

Debido en parte a los requerimientos de limitación en número de páginas por artículo en las publicaciones, los artículos publicados en el compendio que se adjunta (Anexo), no incorporan todos los análisis y gráficos realizados en los trabajos de investigación llevados a cabo. Por ello, a continuación, se presentan de forma esquemática, todos los resultados obtenidos en cada una de las investigaciones parciales que conforman la tesis doctoral, que servirán para demostrar las hipótesis, tanto principales como de trabajo en el capítulo siguiente de conclusiones, de la presente tesis.

### **7.1. ARTÍCULO 1. Medida y análisis del entorno de distribución aéreo de mercancías enviadas mediante DHL y FedEx entre Europa y USA.**

Los resultados obtenidos en la investigación, correspondiente al presente artículo, se describen a continuación.

Parámetro de caída	Sin etiqueta de fragilidad (No Label)		Con etiqueta de fragilidad (Label)	
	FedEx	DHL	FedEx	DHL
Número medio de impactos o caídas acaecidas en un viaje	21	36	24	29
Altura máxima de caída esperada (m)	1.24	1.11	1.21	0.63
Altura máxima de caída para un nivel de probabilidad del 99% (m)	1.06	0.89	0.98	0.58
Altura máxima de caída para un nivel de probabilidad del 95% (m)	0.63	0.52	0.59	0.52
Altura máxima de caída para un nivel de probabilidad del 90% (m)	0.39	0.38	0.37	0.42
Altura media de caída (m)	0.21	0.21	0.20	0.20

Tabla 7.1. Altura de caída medida mayor de 76 mm

Altura de caída (m)	Sin etiqueta de fragilidad (No Label)		Con etiqueta de fragilidad (Label)	
	FedEx	DHL	FedEx	DHL
La más alta	1.24	1.11	1.21	0.63
2º más alta	1.13	0.95	1.08	0.60
3º más alta	0.85	0.91	0.85	0.57
4º más alta	0.75	0.74	0.76	0.57
5º más alta	0.70	0.66	0.73	0.56
6º más alta	0.65	0.66	0.66	0.55
7º más alta	0.64	0.63	0.61	0.53
8º más alta	0.62	0.58	0.59	0.52
9º más alta	0.53	0.57	0.58	0.52
10º más alta	0.50	0.55	0.53	0.52

Tabla 7.2. Altura de caída en orden descendente

Orientación de las caídas (%)	Sin etiqueta de fragilidad (No Label)		Con etiqueta de fragilidad (Label)	
	FedEx	DHL	FedEx	DHL
Arista (Edge)	42.5	45.8	40.8	46.1
Cara (Face)	53.5	43.5	50.3	40.0
Esquina (Corner)	4.0	10.7	8.9	13.9

Tabla 7.3. Orientación del impacto

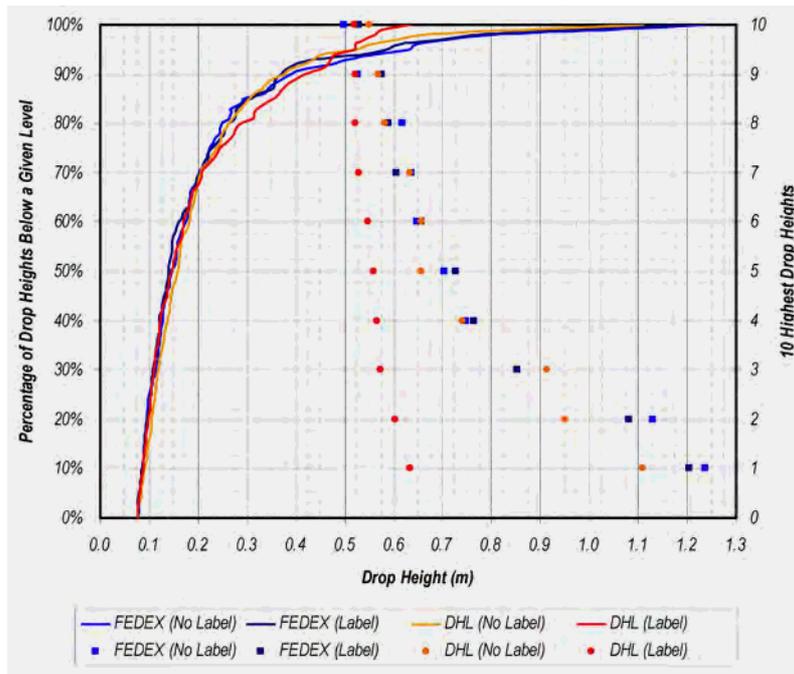


Figura 7.1. Función de distribución acumulada de las alturas de caída esperadas

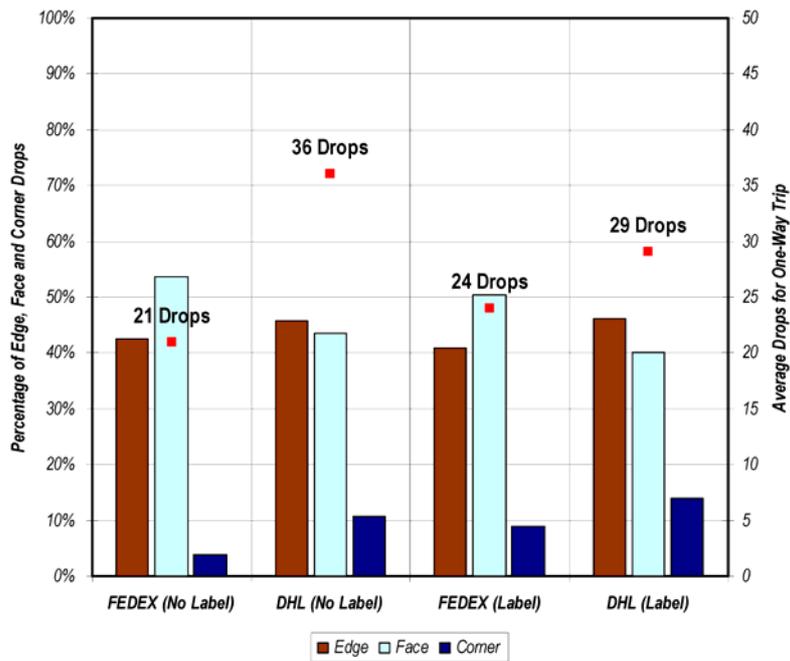


Figura 7.2. Porcentaje de caídas según la orientación del impacto

**7.2. ARTÍCULO 2. Medida y análisis de los niveles de vibración que se transmite a la mercancía en el transporte por carretera en España en función de la carga, el tipo de suspensión y la velocidad del vehículo.**

Los resultados obtenidos en la investigación, correspondiente al presente artículo, se describen a continuación.

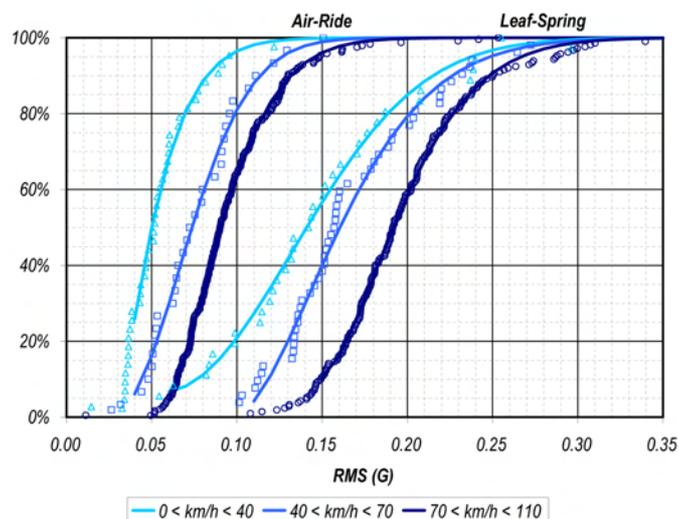


Figura 7.3. CDF del nivel de vibración RMS(G) para cada intervalo de velocidad

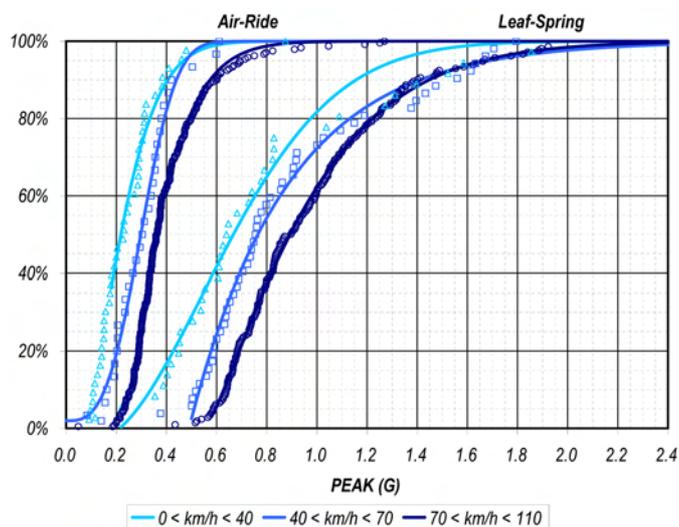


Figura 7.4. CDF del nivel máximo de aceleración para cada intervalo de velocidad

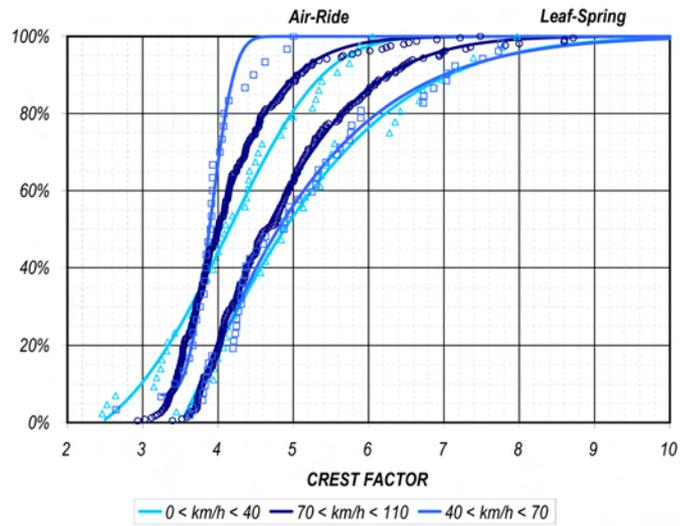


Figura 7.5. CDF del factor de cresta para cada intervalo de velocidad

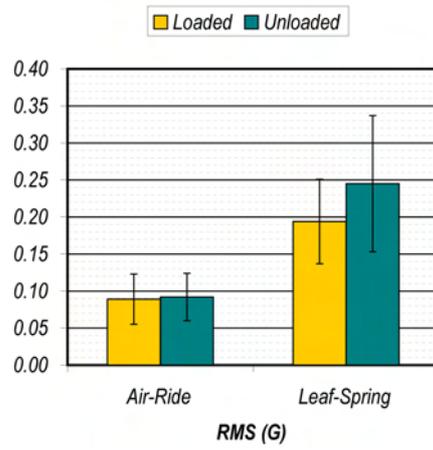


Figura 7.6. Nivel de vibración RMS(G) versus carga y tipo de suspensión del vehículo

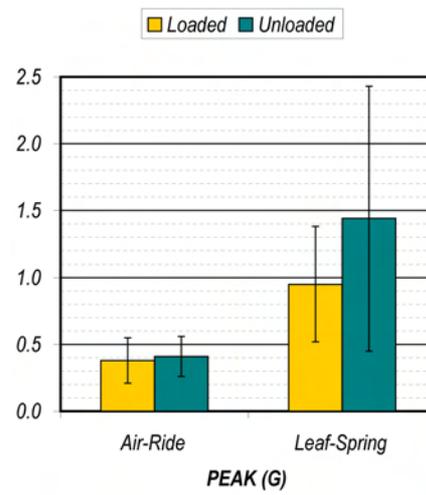


Figura 7.7. Nivel de aceleración máxima versus carga y tipo de suspensión del vehículo

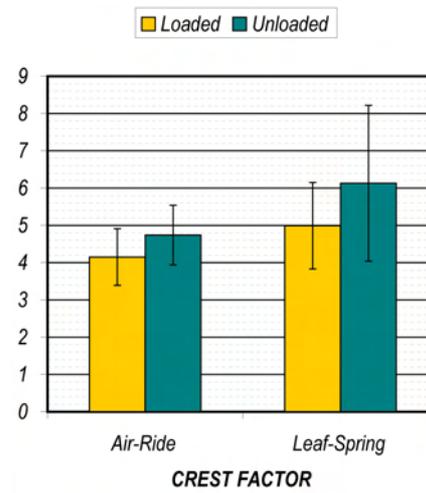


Figura 7.8. Factor de cresta versus carga y tipo de suspensión del vehículo

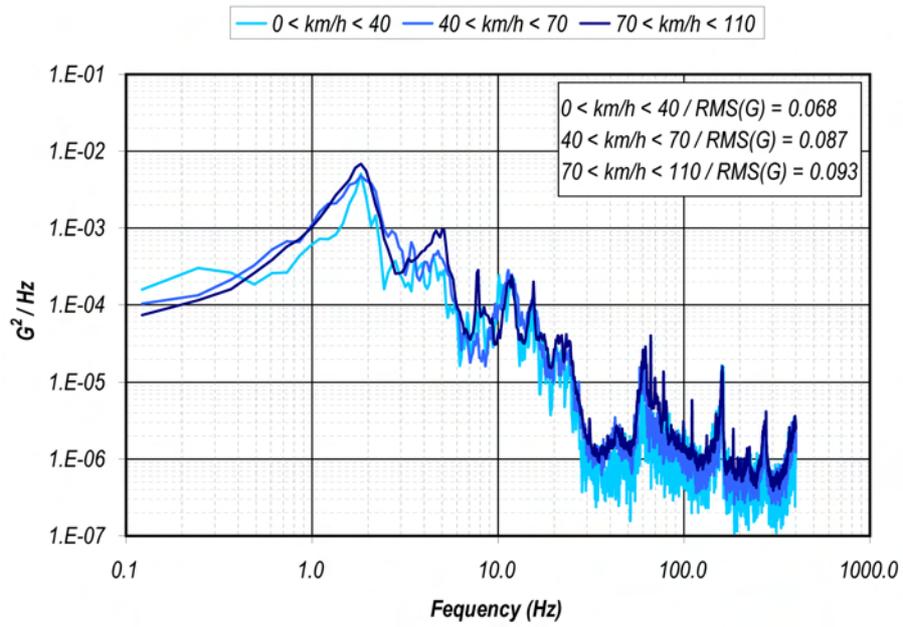


Figura 7.9. PSD versus velocidad para trailer con suspensión neumática vacío

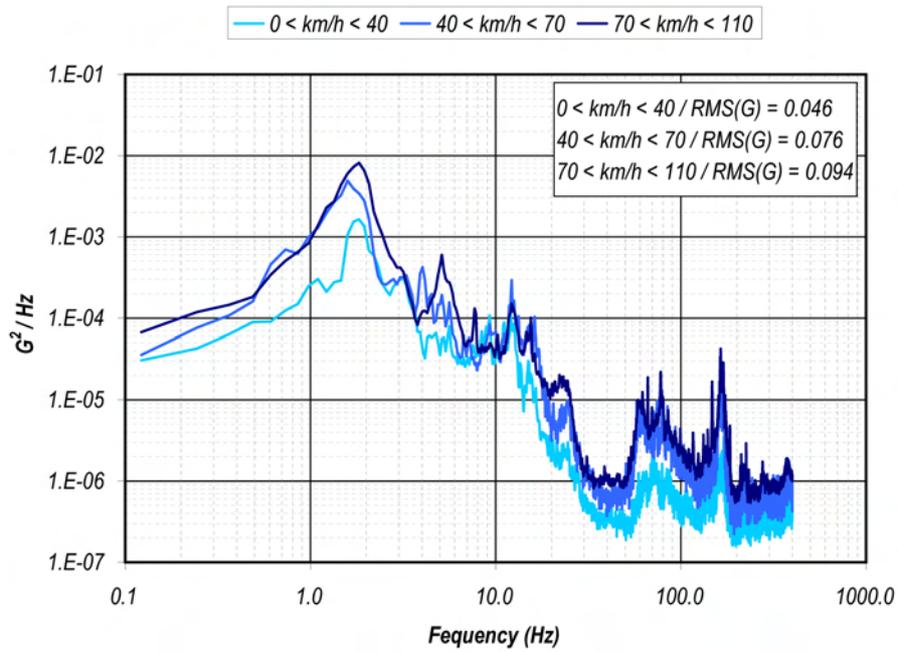


Figura 7.10. PSD versus velocidad para trailer con suspensión neumática (21000 kg)

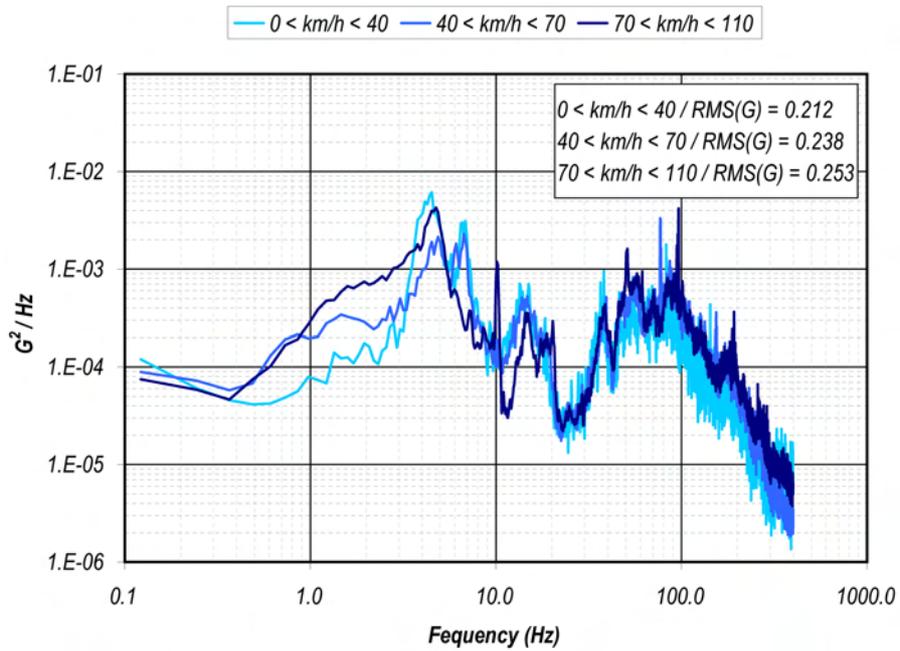


Figura 7.11. PSD versus velocidad para trailer con suspensión de ballesta vacío

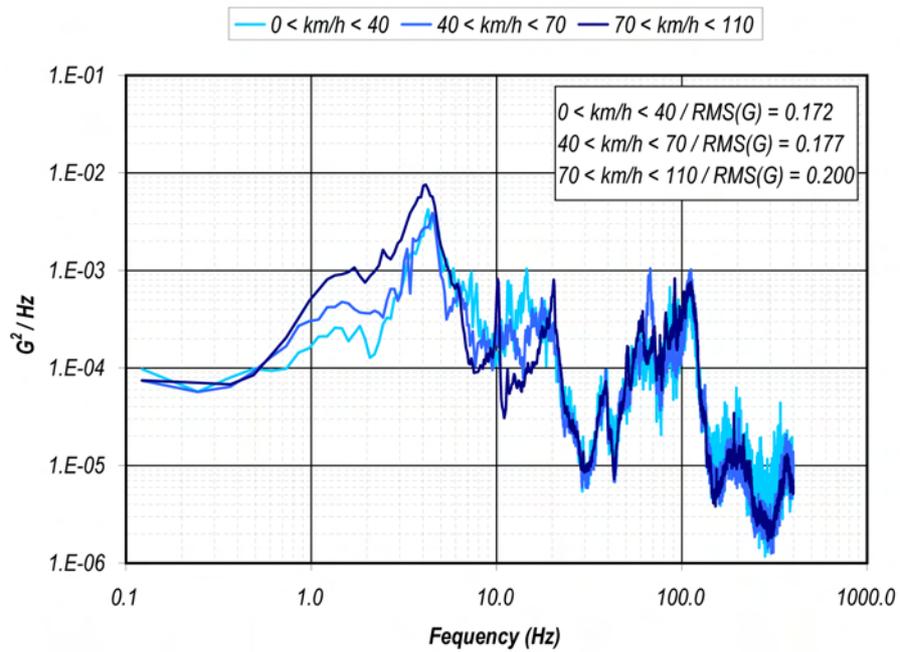


Figura 7.12. PSD versus velocidad para trailer con suspensión de ballesta (3000 kg)

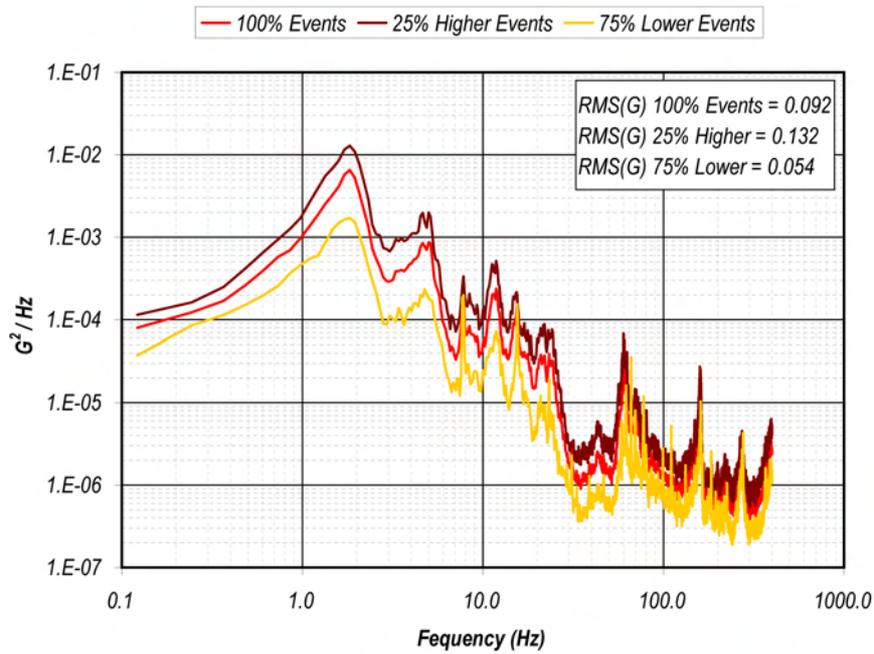


Figura 7.13. PSD de trailer con suspensión neumática vacío versus porcentaje de eventos promediados de la CDF

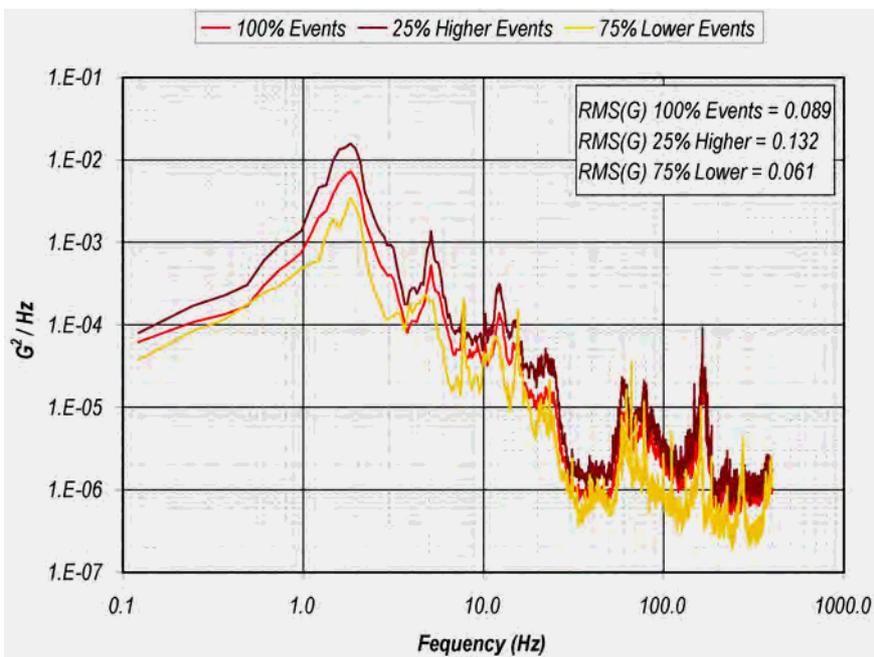


Figura 7.14. PSD de trailer con suspensión neumática (21000 kg) versus porcentaje de eventos promediados de la CDF

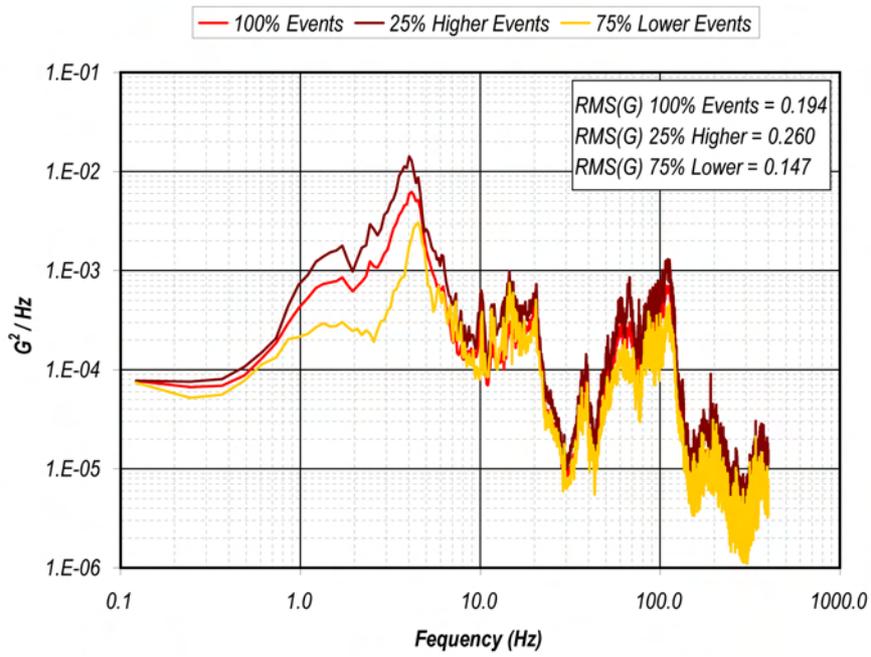


Figura 7.15. PSD de trailer con suspensión de ballesta vacío versus porcentaje de eventos promediados de la CDF

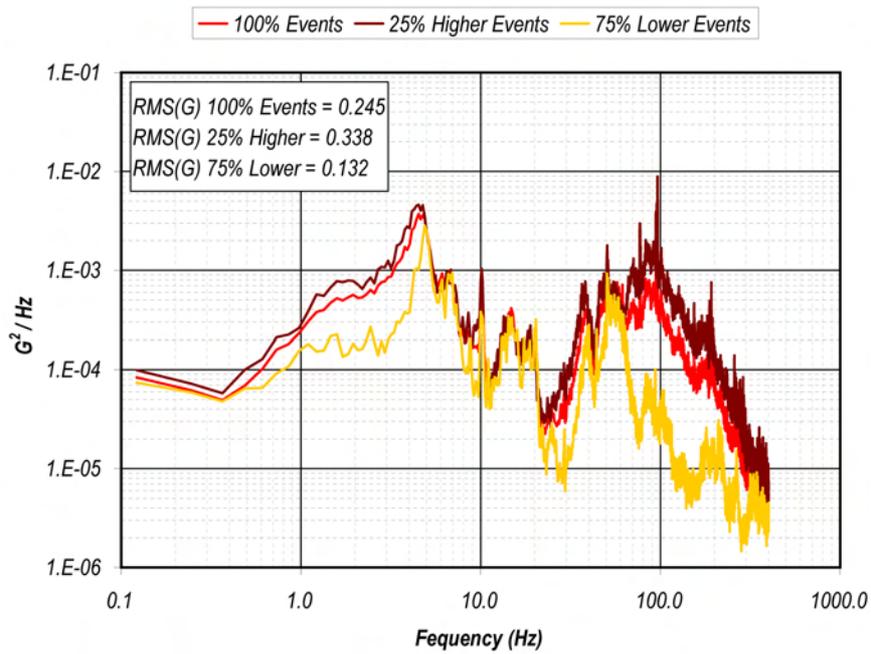


Figura 7.16. PSD de trailer con suspensión de ballesta (3000 kg) versus porcentaje de eventos promediados de la CDF

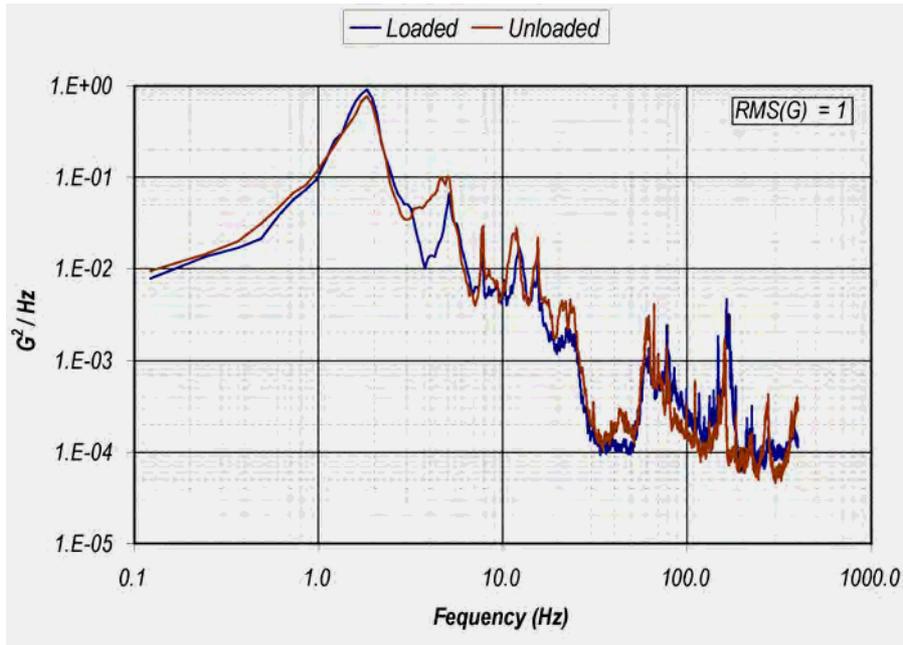


Figura 7.17. Función PSD escalable para trailer con suspensión neumática versus carga

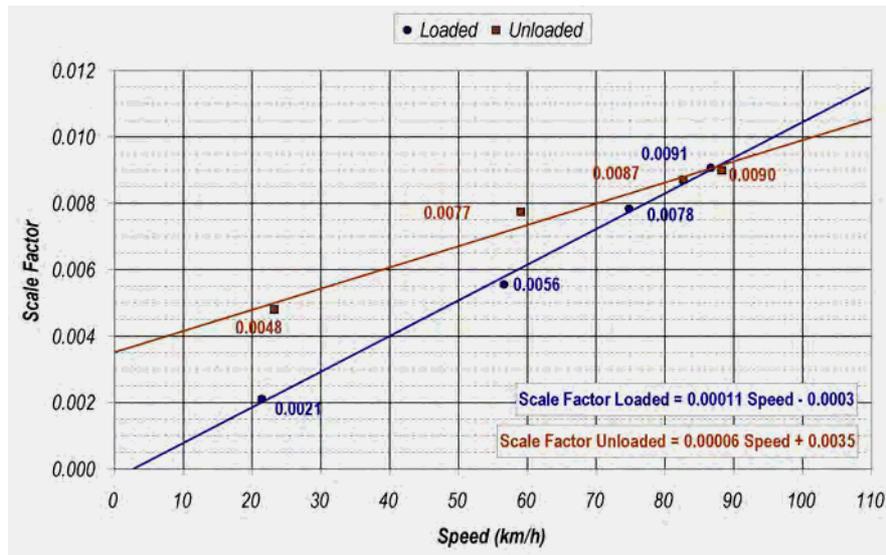


Figura 7.18. Factor de escala de la función PSD escalable para trailer con suspensión neumática versus carga

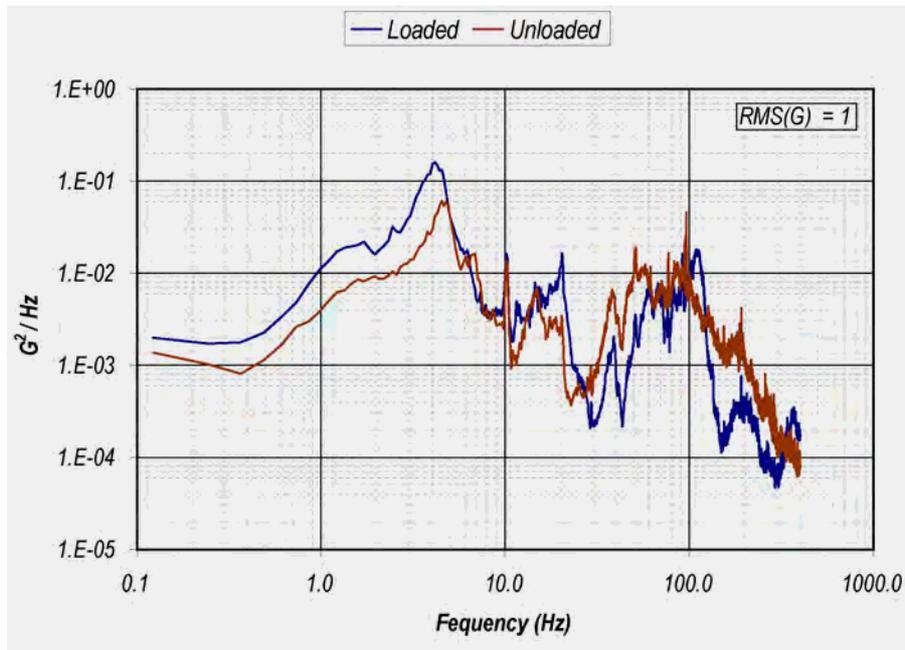


Figura 7.19. Factor de escala de la función PSD escalable para trailer con suspensión de ballesta versus carga

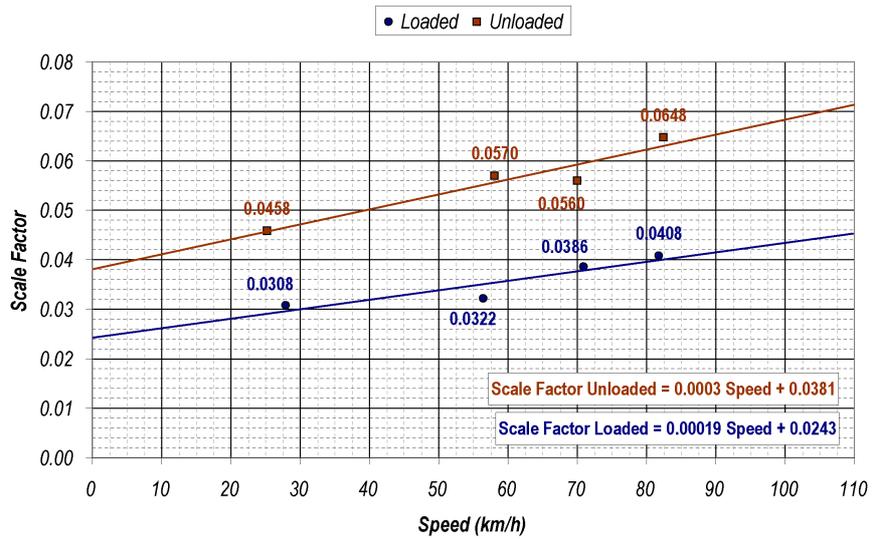


Figura 7.20. Factor de escala de la función PSD escalable para trailer con suspensión de ballesta versus carga

### 7.3. ARTÍCULO 3. Interpretando los datos de impactos para la estimación de los niveles de altura de caída durante el entorno de distribución.

Los resultados obtenidos en la investigación, correspondiente al presente artículo, se describen a continuación.

$n = Method$		$\bar{c}_{io,n} \text{ \& \; } \bar{e}_{io,n}$			$\bar{c}_n \text{ \& \; } \bar{e}_n$
$n$	$io$	<i>Edge</i>	<i>Face</i>	<i>Corner</i>	
	1		1.071	1.018	0.945
2		0.940	0.996	0.934	0.957
3		0.908	0.854	0.897	0.886
4		0.879	0.873	0.944	0.898
5		0.476	0.553	0.633	0.554
6		1.136	1.142	1.058	1.112

Tabla 7.4. Coeficientes medios de calibración y/o restitución (c) y (e) para cada método y grupo de orientación de impacto (arista, cara, esquina)

$n = Method$		$\bar{c}_{io,n} \text{ \& \; } \bar{e}_{io,n}$		$\bar{c}_n \text{ \& \; } \bar{e}_n$	
$n$		<i>Av. Error (%)</i>	<i>Max. Error (%)</i>	<i>Av. Error (%)</i>	<i>Max. Error (%)</i>
	1		7.87	29.13	9.34
2		8.83	28.28	8.67	27.34
3		<b>3.02</b>	<b>11.58</b>	<b>3.79</b>	<b>12.87</b>
4		<b>3.34</b>	<b>15.03</b>	<b>4.11</b>	<b>16.76</b>
5		7.76	40.29	14.50	40.45
6		3.38	14.85	4.12	16.61

Tabla 7.5. Errores medios y máximos de las EDH estimadas para cada método

$n = Method$		$\bar{c}_{io,n} \text{ \& \; } \bar{e}_{io,n}$						$\bar{c}_n \text{ \& \; } \bar{e}_n$					
$H_{drop}$	$n$	<i>Av. Error (%)</i>						<i>Av. Error (%)</i>					
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
18	0.4572	11.72	10.57	<b>5.09</b>	5.57	10.74	5.49	9.14	9.74	<b>5.71</b>	7.85	19.45	7.84
24	0.6096	5.51	8.51	<b>3.65</b>	4.41	6.93	4.39	7.38	8.72	<b>4.16</b>	6.25	14.20	6.26
30	0.7620	5.78	6.41	<b>2.43</b>	2.57	3.69	2.65	8.60	7.15	<b>3.78</b>	3.83	11.58	3.87
36	0.9144	7.46	6.77	2.60	<b>2.42</b>	4.52	2.49	9.72	8.25	3.40	<b>3.04</b>	10.22	3.17
42	1.0668	7.37	7.71	<b>1.96</b>	2.30	8.26	2.38	9.00	7.49	3.25	<b>2.22</b>	15.77	2.23
48	1.2192	10.01	10.38	<b>2.73</b>	3.16	12.93	3.21	12.15	10.88	2.76	<b>2.08</b>	16.60	1.97

Tabla 7.6. Errores medios de las EDH estimadas para cada grupo de alturas de caída y métodos

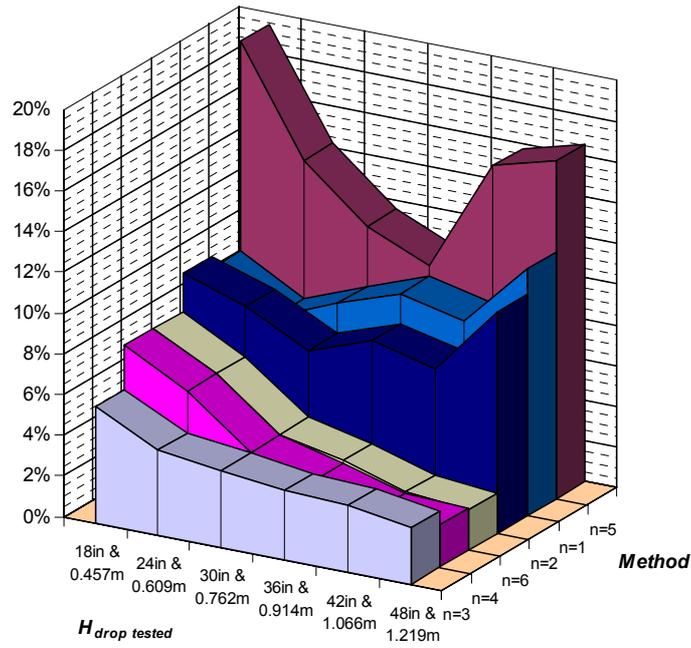


Figura 7.21. Errores en la estimación de la EDH versus altura de caída sin tener en cuenta la orientación del impacto en la calibración

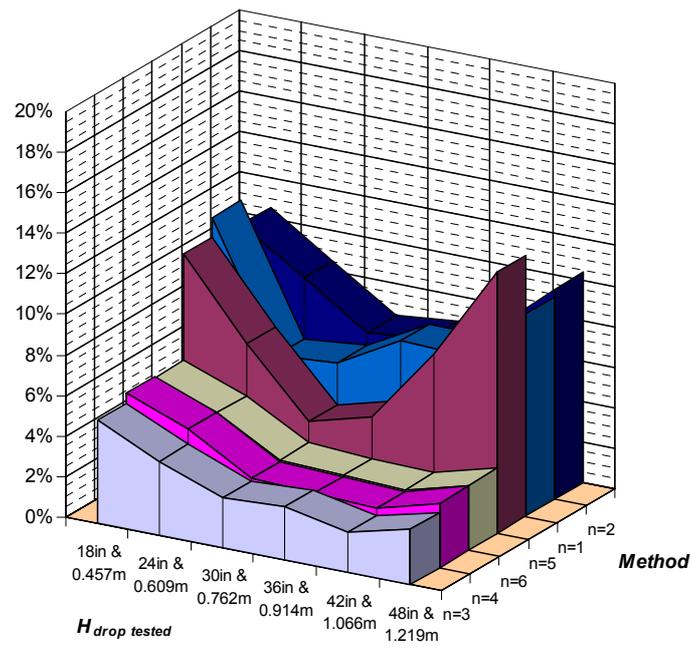


Figura 7.22. Errores en la estimación de la EDH versus altura de caída teniendo en cuenta la orientación del impacto en la calibración

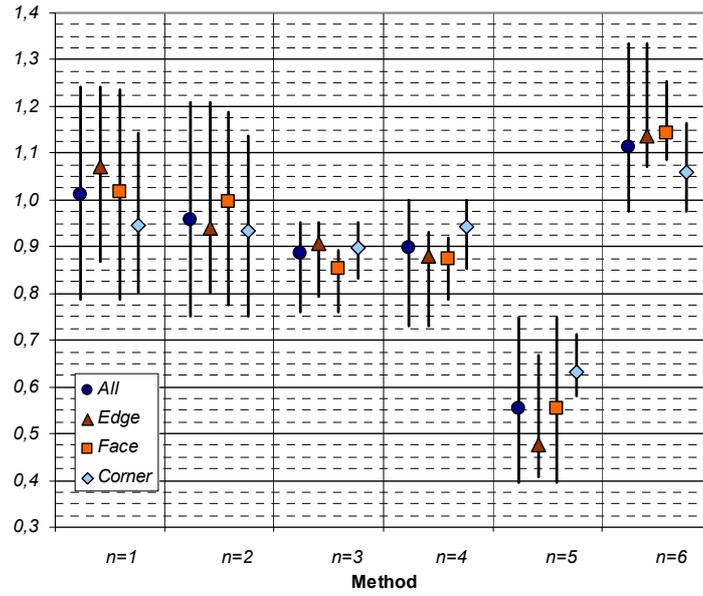


Figura 7.23. Variación en los coeficientes medios de calibración y/o restitución (c) y (e) para cada método y grupo de orientación de impacto (arista, cara, esquina)

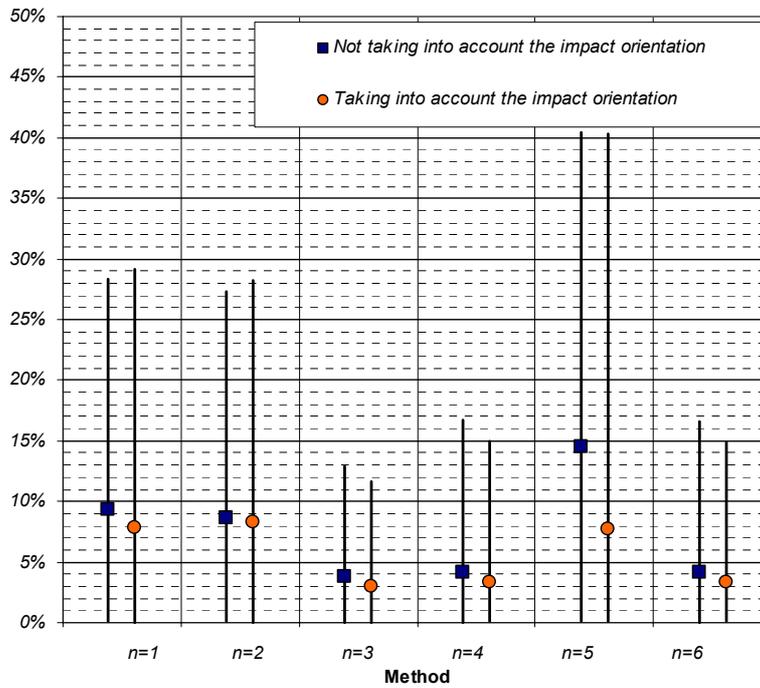


Figura 7.24. Variación en los errores de las EDH estimadas para cada método

### 7.4. ARTÍCULO 4. Monitorizando la evolución de la fatiga en embalajes de cartón ondulado sometidos a cargas dinámicas de compresión aleatorias.

Los resultados obtenidos en la investigación, correspondiente al presente artículo, se describen a continuación.

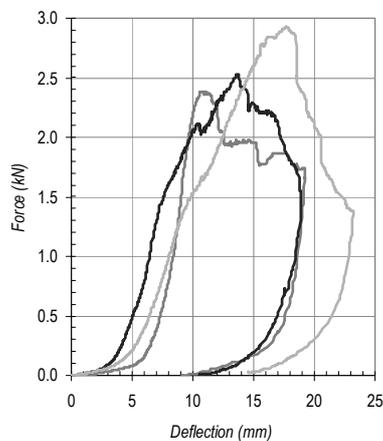


Figura 7.25. Características de compresión de tres cajas idénticas de cartón ondulado

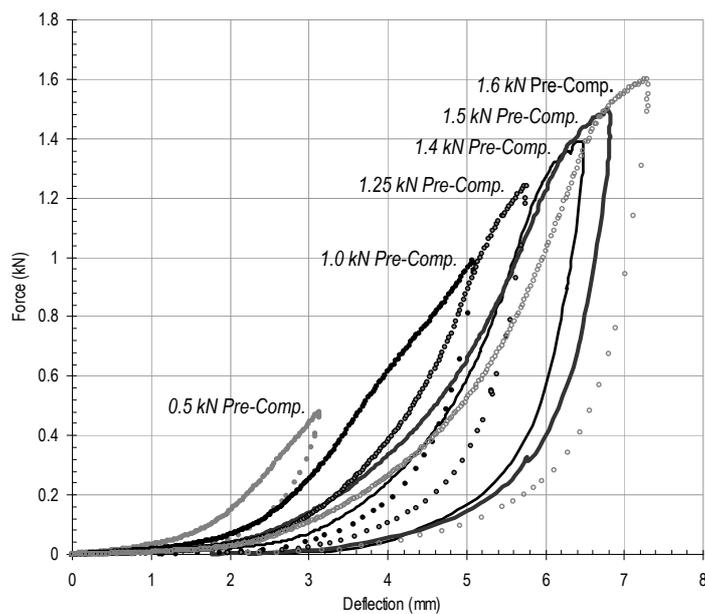


Figura 7.26. Evolución de las características de compresión de una misma caja de cartón sometida a sucesivas cargas de compresión

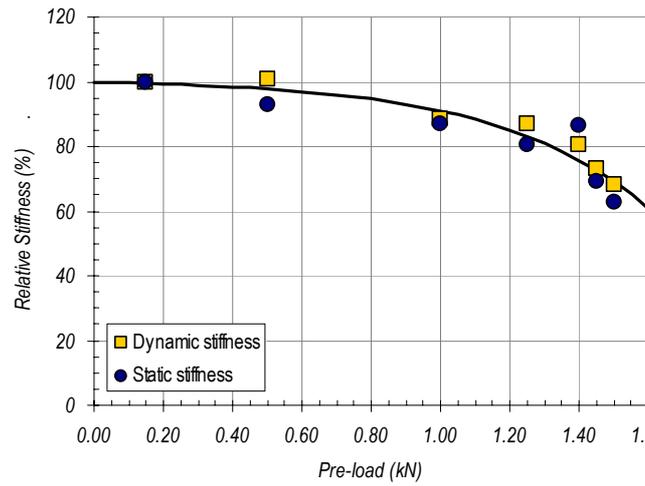


Figura 7.27. Cambio en la rigidez dinámica y estática relativas por la aplicación de cargas de compresión

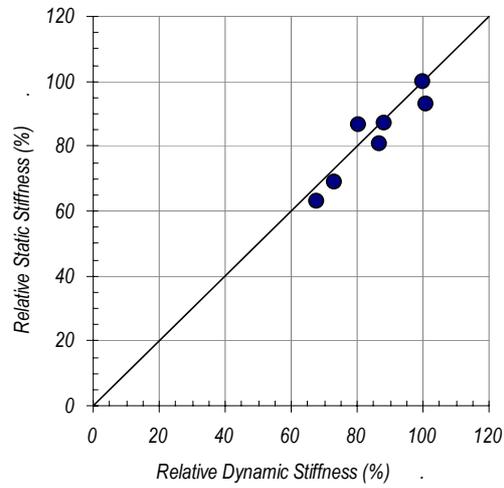
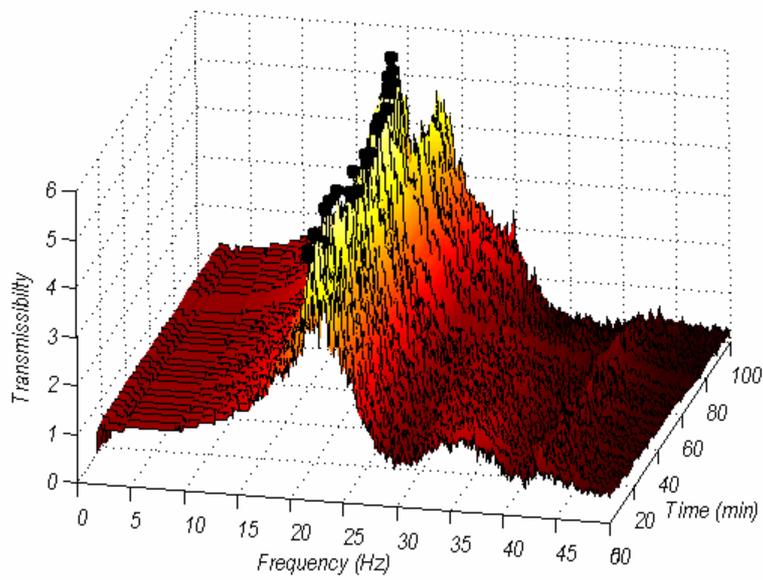
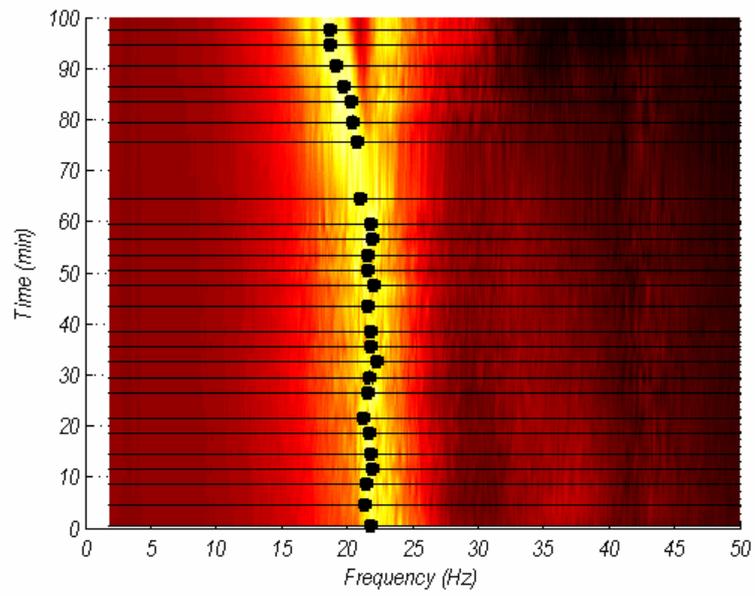


Figura 7.28. Correlación entre la rigidez dinámica y la rigidez estática relativas



7.29. Evolución de la función de respuesta en frecuencia (FRF) durante compresión dinámica aleatoria en una cajas de cartón ondulado

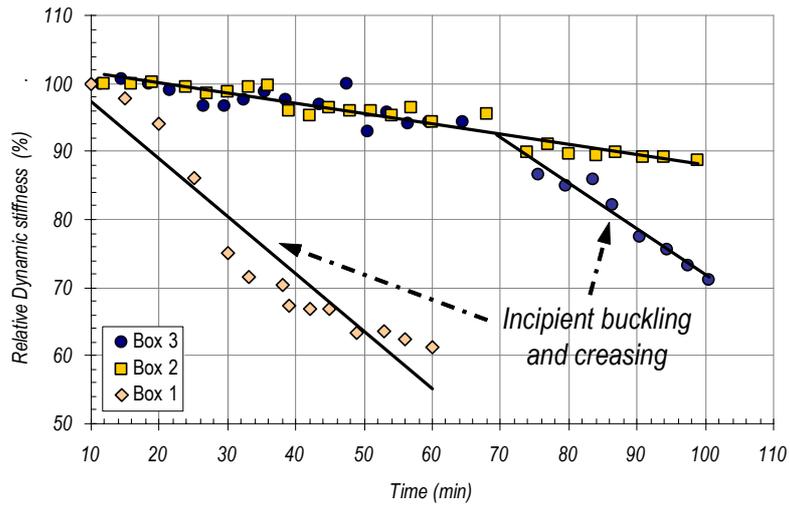


Figura 7.30. Evolución de la rigidez dinámica relativa para cajas de cartón ondulado

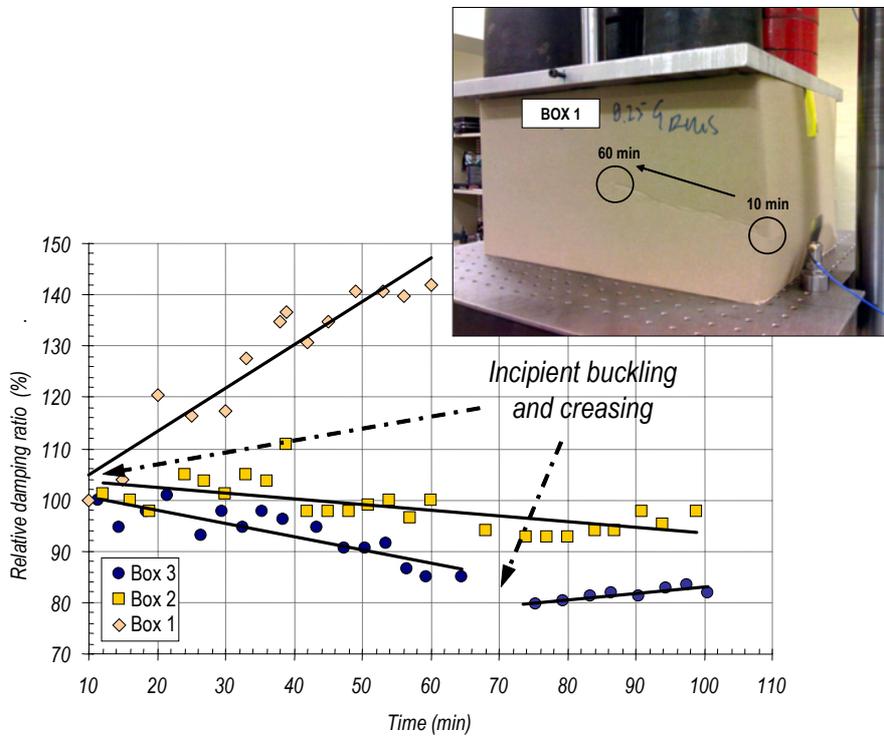


Figura 7.31. Evolución del amortiguamiento relativo para cajas de cartón ondulado

**7.5. ARTÍCULO 5. Nuevo modelo de distribución estadística de las vibraciones aleatorias generadas por vehículos en carretera.**

Los resultados obtenidos en la investigación, correspondiente al presente artículo, se describen a continuación.

$$f(x) = \rho \cdot \left(\frac{|x-x_0|}{\alpha}\right)^{\gamma-1} \cdot e^{-\left(\frac{|x-x_0|}{\alpha}\right)^\beta} \quad \forall \begin{cases} x \in [-\infty \vee (x_i // x_i \geq x_0), +\infty[ \\ \alpha \in \mathbb{R}^+ \\ \beta, \gamma \in \mathbb{R} \setminus \{0\} \\ x_0 \in \mathbb{R} \\ x_i \in \mathbb{R} \cup -\infty \\ \text{sign}(\beta) = \text{sign}(\gamma) \end{cases}$$

where

$$\rho = \frac{2|\beta| \cdot |\beta|}{(\delta_{x_i}^{-\infty} + 1) \cdot \alpha \cdot \left( (|\beta| \cdot (\delta_{x_i}^{-\infty} + 1) + \beta \cdot (\delta_{x_i}^{-\infty} - 1)) \cdot \Gamma[\gamma/\beta] + 2\beta \cdot (1 - \delta_{x_i}^{-\infty}) \cdot \Gamma\left[\gamma/\beta, \left(\frac{x_i - x_0}{\alpha}\right)^\beta\right] \right)}$$

$$\delta_a^b \rightarrow \begin{cases} \forall a = b \rightarrow \delta_a^b = 1 \\ \forall a \neq b \rightarrow \delta_a^b = 0 \end{cases}$$

Ecuación 7.1. Función de densidad de probabilidad del nuevo modelo generalizado desarrollado para procesos aleatorios

Probability Density Distribution	$x_i$	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$x_0$	$\rho$
Gaussian	$-\infty$	$\sigma\sqrt{2}$	2	1	$\mu$	$\sqrt{\pi}$
Rayleigh	0	$\sigma\sqrt{2}$	2	2	0	1
Chi-Square	0	2	1	$\frac{1}{2}$	0	$\Gamma[\frac{1}{2}]$
Exponential	0	$\frac{1}{\lambda}$	1	1	0	1
Generalized Error	$-\infty$	a	b	1	0	$\Gamma[\frac{1}{b}]$
Gamma	0	$\theta$	1	k	0	$\Gamma[k]$
Generalized Extreme Value	$\mu - \frac{\sigma}{\epsilon}$	$\frac{\sigma}{\epsilon}$	$-\frac{1}{\epsilon}$	$-\frac{1}{\epsilon}$	$\mu - \frac{\sigma}{\epsilon}$	1
Inverse Chi-Square	0	$\frac{1}{2}$	-1	$-\frac{1}{2}$	0	$\Gamma[\frac{1}{2}]$
Inverse Gamma	0	$\beta$	-1	$-\alpha$	0	$\Gamma[\alpha]$
Laplace	$-\infty$	b	1	1	$\mu$	1
Lévy	0	$\frac{c}{2}$	-1	$-\frac{1}{2}$	0	$\sqrt{\pi}$
Pearson Type III	$\alpha$	$\beta$	1	p	$\alpha$	$\Gamma[p]$
Gumbel Type II	0	$b^{\frac{1}{a}}$	-a	-a	0	1
Weibull two-parameters	0	$\alpha$	$\gamma$	$\gamma$	0	1
Weibull three-parameters	$x_0$	$\alpha$	$\gamma$	$\gamma$	$x_0$	1

Tabla 7.7. Valores de los parámetros del nuevo modelo para distribuciones conocidas

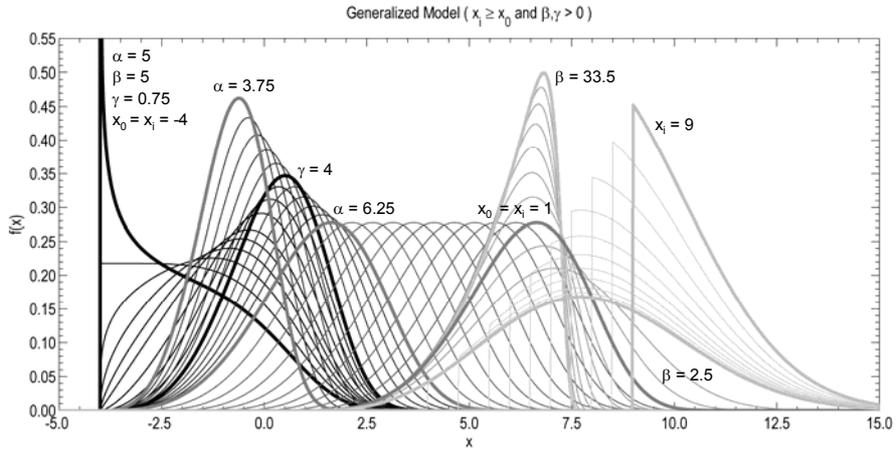


Figura 7.32. Influencia de cada uno de los parámetros del nuevo modelo generalizado en una distribución estadística no-simétrica ( $x_i \neq -\infty$  and  $x_i \geq x_0$ )

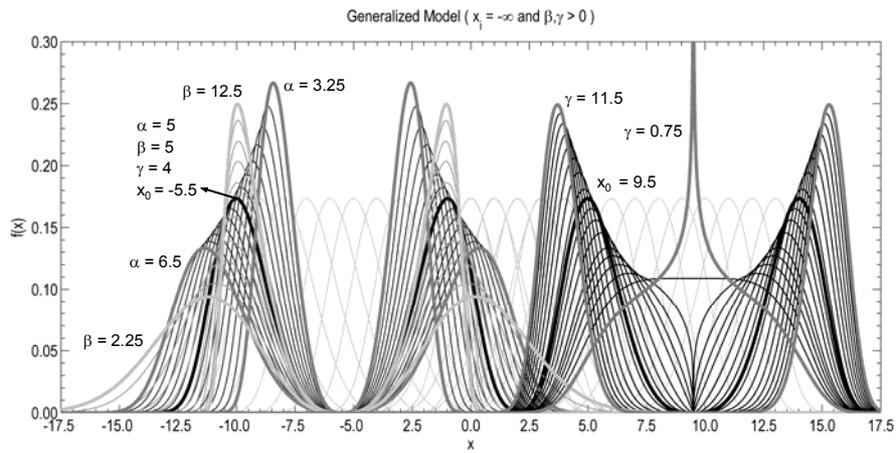


Figura 7.33. Influencia de cada uno de los parámetros del nuevo modelo generalizado en una distribución estadística simétrica ( $x_i = -\infty$ )

When  $x_i = -\infty$

$$z_n = \delta_n^{2\text{int}(\frac{\gamma}{2})} \cdot \alpha^n \frac{\Gamma\left[\frac{\gamma+n}{\beta}\right]}{\Gamma\left[\frac{\gamma}{\beta}\right]} \quad \forall \begin{cases} x \in ]-\infty, +\infty[ \\ \alpha \in \mathbb{R}^+ \\ \beta, \gamma \in \mathbb{R} \setminus \{0\} \\ \text{sign}(\beta) = \text{sign}(\gamma) \\ n \in \mathbb{Z}^+ // \frac{\gamma+n}{\beta} > 0 \rightarrow \forall \gamma < 0 \Rightarrow n < |\gamma| \end{cases}$$

When  $x_i \neq -\infty$

$$z_n = (1-n) \cdot (-\mu)^n + \sum_{k=2}^n \frac{n!}{k!(n-k)!} (-\mu)^{n-k} \sum_{j=0}^k \frac{k!}{j!(k-j)!} \alpha^j x_0^{k-j} \frac{\Gamma^{[j, x_i]}}{\Gamma^{[0, x_i]}}$$

$$\forall \begin{cases} x \in [x_i \geq x_0, +\infty[ \\ \alpha \in \mathbb{R}^+ \\ \beta, \gamma \in \mathbb{R} \setminus \{0\} \\ x_0, x_i \in \mathbb{R} \\ \text{sign}(\beta) = \text{sign}(\gamma) \\ n \in \mathbb{Z}^+ // \frac{\gamma+j}{\beta} > 0 \rightarrow \forall \gamma < 0 \Rightarrow j < |\gamma| \end{cases}$$

where

$\mu = m_1 \rightarrow \text{Mean}$

$$m_n = \sum_{j=0}^n \frac{n!}{j!(n-j)!} \alpha^j x_0^{n-j} \frac{\Gamma^{[j, x_i]}}{\Gamma^{[0, x_i]}}$$

$$\Gamma^{[j, x_i]} = (|\beta| - \beta) \cdot \Gamma\left[\frac{\gamma+j}{\beta}\right] + 2\beta \cdot \Gamma\left[\frac{\gamma+j}{\beta}, \left(\frac{x_i - x_0}{\alpha}\right)^\beta\right]$$

$$\delta_a^b \rightarrow \begin{cases} \forall a = b \rightarrow \delta_a^b = 1 \\ \forall a \neq b \rightarrow \delta_a^b = 0 \end{cases}$$

Ecuación 7.2. Momentos centrales del nuevo modelo generalizado desarrollado para procesos aleatorios

When  $x_i = -\infty$

$$\mu = x_0 \quad \forall \begin{cases} x \in ]-\infty, +\infty[ \\ x_0 \in \mathbb{R} \end{cases}$$

When  $x_i \neq -\infty$

$$\mu = m_1 = x_0 + \alpha \frac{\Gamma^{[1, x_i]}}{\Gamma^{[0, x_i]}} \quad \forall x \in [x_i \geq x_0, +\infty[$$

Ecuación 7.3. Parámetro estadístico “Media” del nuevo modelo generalizado desarrollado para procesos aleatorios

$$\begin{aligned}
&\underline{\text{When } x_i = -\infty} \\
&mdn = x_0 \quad \forall \begin{cases} x \in ]-\infty, +\infty[ \\ x_0 \in \mathbb{R} \end{cases} \\
&\underline{\text{When } x_i \neq -\infty} \\
&\frac{1}{2} = \frac{\Gamma^{[0,mdn]}}{\Gamma^{[0,x_i]}} \quad \forall \begin{cases} mdn \geq x_0 \\ x_i \geq x_0 \\ \alpha \in \mathbb{R}^+ \\ \beta, \gamma \in \mathbb{R} \setminus \{0\} \\ x_0, x_i \in \mathbb{R} \\ \text{sign}(\beta) = \text{sign}(\gamma) \end{cases}
\end{aligned}$$

where

$$\Gamma^{[j,x_i]} = (|\beta| - \beta) \cdot \Gamma\left[\frac{\gamma+j}{\beta}\right] + 2\beta \cdot \Gamma\left[\frac{\gamma+j}{\beta}, \left(\frac{x_i - x_0}{\alpha}\right)^\beta\right]$$

Ecuación 7.4. Parámetro estadístico “Mediana” del nuevo modelo generalizado desarrollado para procesos aleatorios

$$\begin{aligned}
&\underline{\text{When } x_i = -\infty} \\
&Var = \sigma^2 = z_2 = \alpha^2 \frac{\Gamma^{[2]}}{\Gamma^{[0]}} \quad \forall x \in ]-\infty, +\infty[ \\
&\underline{\text{When } x_i \neq -\infty} \\
&Var = \sigma^2 = z_2 = -\mu^2 + x_0^2 + 2 \cdot \alpha \cdot x_0 \frac{\Gamma^{[1,x_i]}}{\Gamma^{[0,x_i]}} + \alpha^2 \frac{\Gamma^{[2,x_i]}}{\Gamma^{[0,x_i]}} \quad \forall x \in [x_i \geq x_0, +\infty[ \\
&\text{where} \\
&\Gamma^{[j,x_i]} = (|\beta| - \beta) \cdot \Gamma\left[\frac{\gamma+j}{\beta}\right] + 2\beta \cdot \Gamma\left[\frac{\gamma+j}{\beta}, \left(\frac{x_i - x_0}{\alpha}\right)^\beta\right] \\
&\Gamma^{[j]} = \Gamma\left[\frac{\gamma+j}{\beta}\right]
\end{aligned}$$

Ecuación 7.5. Parámetro estadístico “Varianza” del nuevo modelo generalizado desarrollado para procesos aleatorios

$$\begin{aligned}
&\underline{\text{When } x_i = -\infty} \\
&Sk = v = \frac{z_3}{z_2^{3/2}} = 0 \quad \forall x \in ]-\infty, +\infty[ \\
&\underline{\text{When } x_i \neq -\infty} \\
&Sk = v = \frac{z_3}{z_2^{3/2}} = \frac{1}{\sigma^3} \cdot \left[ 2\mu^3 - 3\mu \left( x_0^2 + 2\alpha x_0 \frac{\Gamma^{[1,x_i]}}{\Gamma^{[0,x_i]}} + \alpha^2 \frac{\Gamma^{[2,x_i]}}{\Gamma^{[0,x_i]}} \right) + x_0^3 + 3\alpha x_0^2 \frac{\Gamma^{[1,x_i]}}{\Gamma^{[0,x_i]}} + 3\alpha^2 x_0 \frac{\Gamma^{[2,x_i]}}{\Gamma^{[0,x_i]}} + \alpha^3 \frac{\Gamma^{[3,x_i]}}{\Gamma^{[0,x_i]}} \right] \\
&\forall x \in [x_i \geq x_0, +\infty[ \\
&\text{where} \\
&\Gamma^{[j,x_i]} = (|\beta| - \beta) \cdot \Gamma\left[\frac{\gamma+j}{\beta}\right] + 2\beta \cdot \Gamma\left[\frac{\gamma+j}{\beta}, \left(\frac{x_i - x_0}{\alpha}\right)^\beta\right] \\
&\Gamma^{[j]} = \Gamma\left[\frac{\gamma+j}{\beta}\right]
\end{aligned}$$

Ecuación 7.6. Parámetro estadístico “Coeficiente de asimetría o Skewness” del nuevo modelo generalizado desarrollado para procesos aleatorios

When  $x_i = -\infty$

$$Kt = \frac{z_4}{z_2^2} = \frac{1}{\sigma^4} \alpha^4 \frac{\Gamma^{[4, \mu_i]}}{\Gamma^{[0, \mu_i]}} \quad \forall x \in ]-\infty, +\infty[$$

When  $x_i \neq -\infty$

$$Kt = \frac{z_4}{z_2^2} = \frac{1}{\sigma^4} \cdot \left[ \begin{array}{l} -3\mu^4 + 6\mu^2 \cdot \left( x_0^2 + 2\alpha x_0 \frac{\Gamma^{[1, x_i]}}{\Gamma^{[0, x_i]}} + \alpha^2 \frac{\Gamma^{[2, x_i]}}{\Gamma^{[0, x_i]}} \right) - \\ -4\mu \left( x_0^3 + 3\alpha x_0^2 \frac{\Gamma^{[1, x_i]}}{\Gamma^{[0, x_i]}} + 3\alpha^2 x_0 \frac{\Gamma^{[2, x_i]}}{\Gamma^{[0, x_i]}} + \alpha^3 \frac{\Gamma^{[3, x_i]}}{\Gamma^{[0, x_i]}} \right) + \\ + x_0^4 + 4\alpha x_0^3 \frac{\Gamma^{[1, x_i]}}{\Gamma^{[0, x_i]}} + 6\alpha^2 x_0^2 \frac{\Gamma^{[2, x_i]}}{\Gamma^{[0, x_i]}} + 4\alpha^3 x_0 \frac{\Gamma^{[3, x_i]}}{\Gamma^{[0, x_i]}} + \alpha^4 \frac{\Gamma^{[4, x_i]}}{\Gamma^{[0, x_i]}} \end{array} \right] \quad \forall x \in [x_i \geq x_0, +\infty[$$

where

$$\Gamma^{[j, x_i]} = (|\beta| - \beta) \cdot \Gamma\left[\frac{\gamma+j}{\beta}\right] + 2\beta \cdot \Gamma\left[\frac{\gamma+j}{\beta}, \left(\frac{x_i - x_0}{\alpha}\right)^\beta\right]$$

$$\Gamma^{[j]} = \Gamma\left[\frac{\gamma+j}{\beta}\right]$$

Ecuación 7.7. Parámetro estadístico “Coeficiente de curtosis o Kurtosis” del nuevo modelo generalizado desarrollado para procesos aleatorios

$$F(x) = \frac{\left[ 1 + \delta_{x_i}^{-\infty} \cdot (\delta_x^{\geq x_0} - 1) + \frac{\delta_{x_i}^{-\infty} \cdot \left( (-1)^{\delta_x^{\geq x_0}} - 1 \right) + 1}{3\delta_{x_i}^{-\infty} + 1} \cdot \left( (|\beta| - \beta) \cdot \Gamma\left[\frac{\gamma}{\beta}\right] + 2\beta \cdot \Gamma\left[\frac{\gamma}{\beta}, \left(\frac{|x - x_0|}{\alpha}\right)^\beta\right] \right) \right]}{\left[ |\beta| \cdot \Gamma\left[\frac{\gamma}{\beta}\right] + (1 - \delta_{x_i}^{-\infty}) \cdot \left( 2\beta \cdot (1 - \delta_{x_i}^{-\infty}) \cdot \Gamma\left[\frac{\gamma}{\beta}, \left(\frac{x_i - x_0}{\alpha}\right)^\beta\right] - \beta \cdot \Gamma\left[\frac{\gamma}{\beta}\right] \right) \right]}$$

$$\forall \left\{ \begin{array}{l} x \in [-\infty \vee (x_i // x_i \geq x_0), +\infty[ \\ \alpha \in \mathbb{R}^+ \\ \beta, \gamma \in \mathbb{R} \setminus \{0\} \\ x_0 \in \mathbb{R} \\ x_i \in \mathbb{R} \cup -\infty \\ \text{sign}(\beta) = \text{sign}(\gamma) \end{array} \right.$$

where

$$\delta_a^b \rightarrow \begin{cases} \forall a = b \rightarrow \delta_a^b = 1 \\ \forall a \neq b \rightarrow \delta_a^b = 0 \end{cases}$$

Ecuación 7.8. Función de probabilidad acumulada del nuevo modelo generalizado desarrollado para procesos aleatorios

$$P(x) = \begin{cases} 0 & \forall x \in ]-\infty, x_0[ \\ \frac{\beta}{\alpha \cdot \Gamma[\frac{\gamma}{\beta}, 0]} \left(\frac{x-x_0}{\alpha}\right)^{\gamma-1} \cdot e^{-\left(\frac{x-x_0}{\alpha}\right)^\beta} & \forall x \in [x_0, +\infty[ \end{cases} \quad \forall \begin{cases} \alpha, \beta, \gamma \in \mathbb{R}^+ \\ x_0 \in \mathbb{R} \end{cases}$$

Ecuación 7.9. Función de densidad de probabilidad simplificada para procesos vibratorios de vehículos en carretera

Probability Density Distribution	$x_i$	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$x_0$	$\rho$
Rayleigh	0	$\sigma\sqrt{2}$	2	2	0	1
Chi-Square	0	2	1	$k/2$	0	$\Gamma[k/2]$
Exponential	0	$1/\lambda$	1	1	0	1
Gamma	0	$\theta$	1	k	0	$\Gamma[k]$
Pearson Type III	$\alpha$	$\beta$	1	p	$\alpha$	$\Gamma[p]$
Weibull two-parameters	0	$\alpha$	$\gamma$	$\gamma$	0	1
Weibull three-parameters	$x_0$	$\alpha$	$\gamma$	$\gamma$	$x_0$	1

Tabla 7.8. Valores de los parámetros del modelo simplificado para distribuciones conocidas ( $x_i = x_0$ )

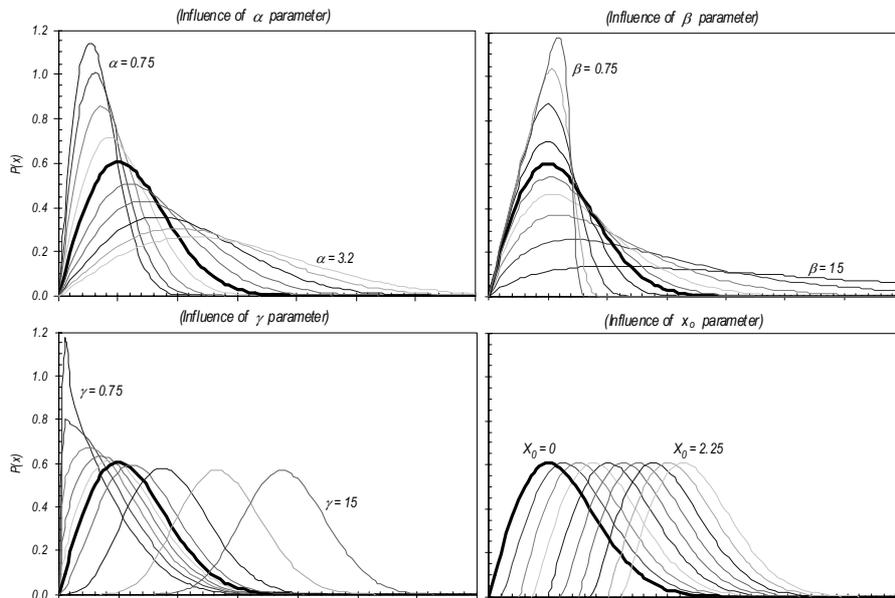


Figura 7.34. Influencia de cada uno de los parámetros en la función de densidad de probabilidad del modelo simplificado

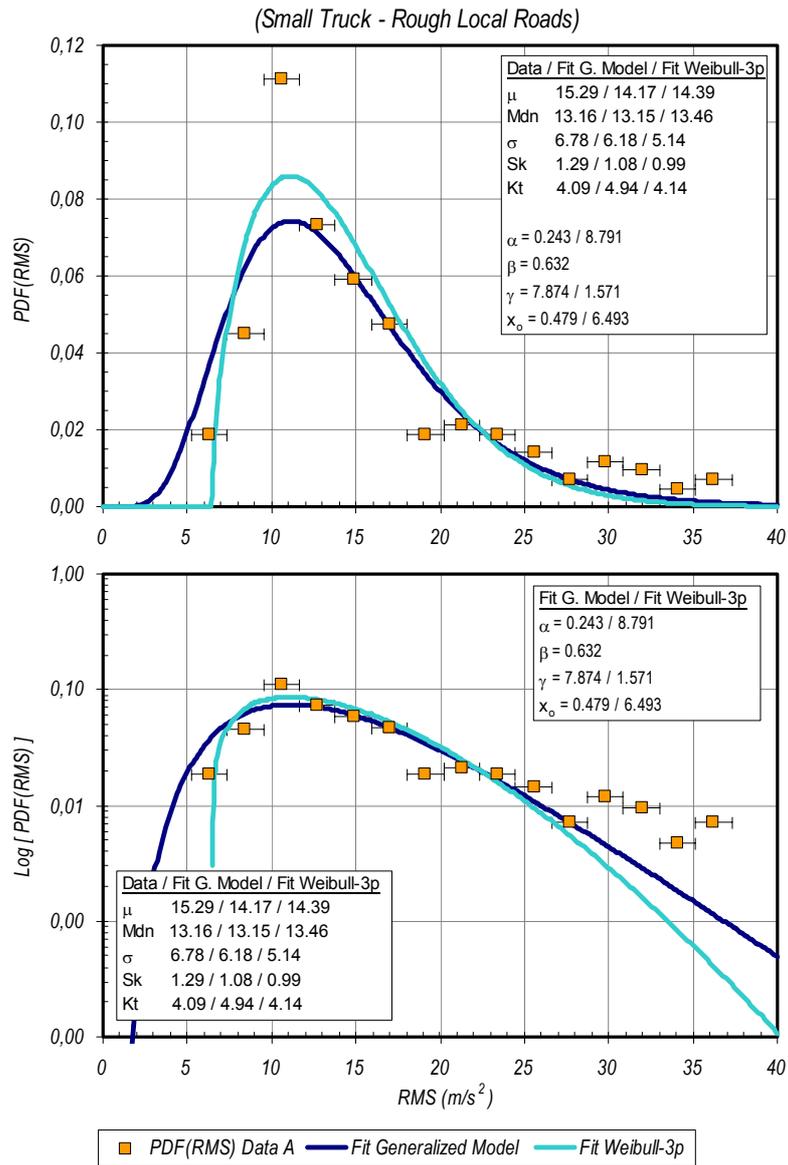


Figura 7.35. Ajuste de la función de densidad de probabilidad del registro-Data-A con el nuevo modelo simplificado y el modelo de tres parámetros de Weibull

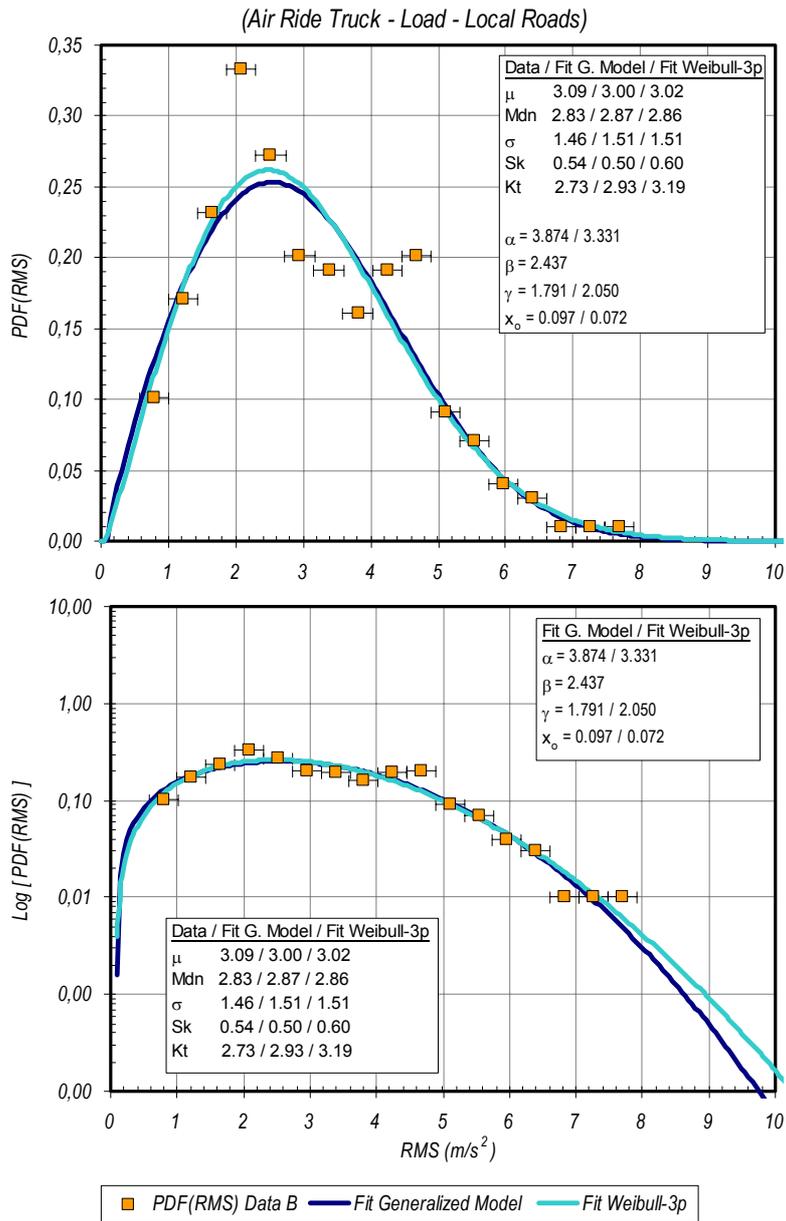


Figura 7.36. Ajuste de la función de densidad de probabilidad del registro-Data-B con el nuevo modelo simplificado y el modelo de tres parámetros de Weibull

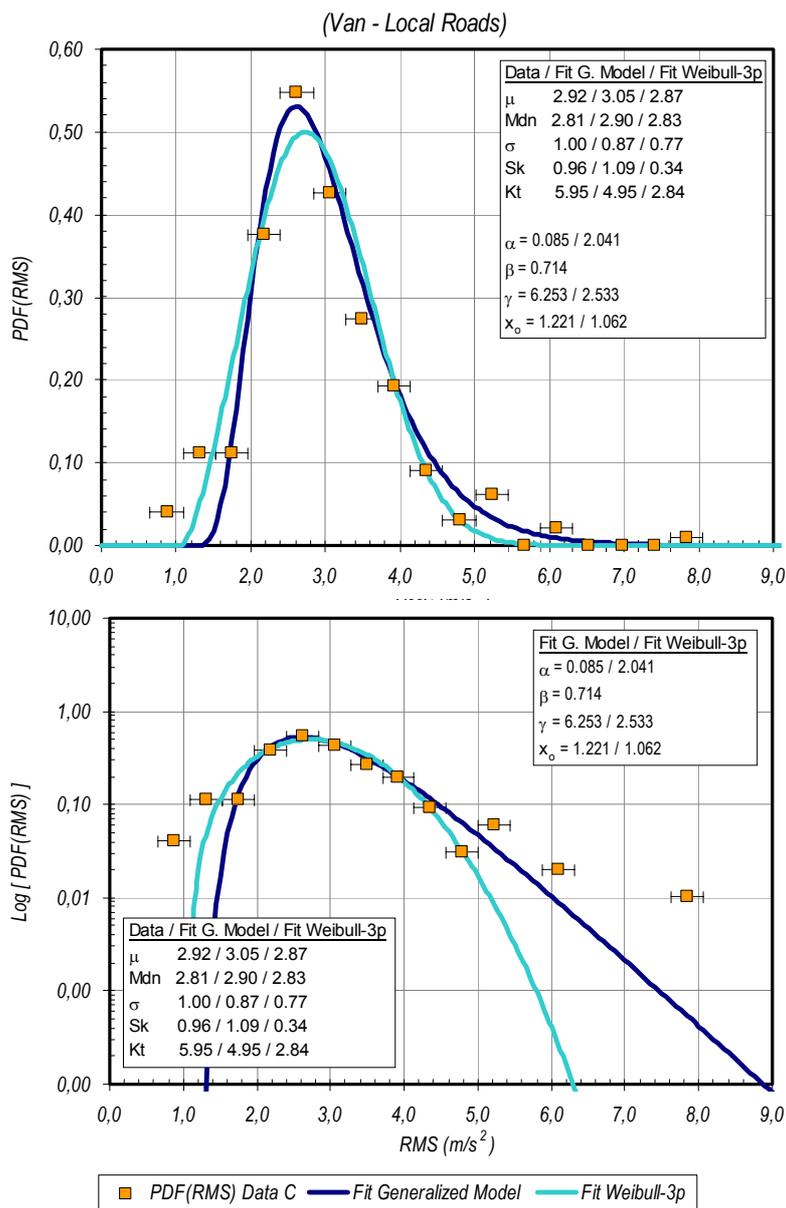


Figura 7.37. Ajuste de la función de densidad de probabilidad del registro-Data-C con el nuevo modelo simplificado y el modelo de tres parámetros de Weibull

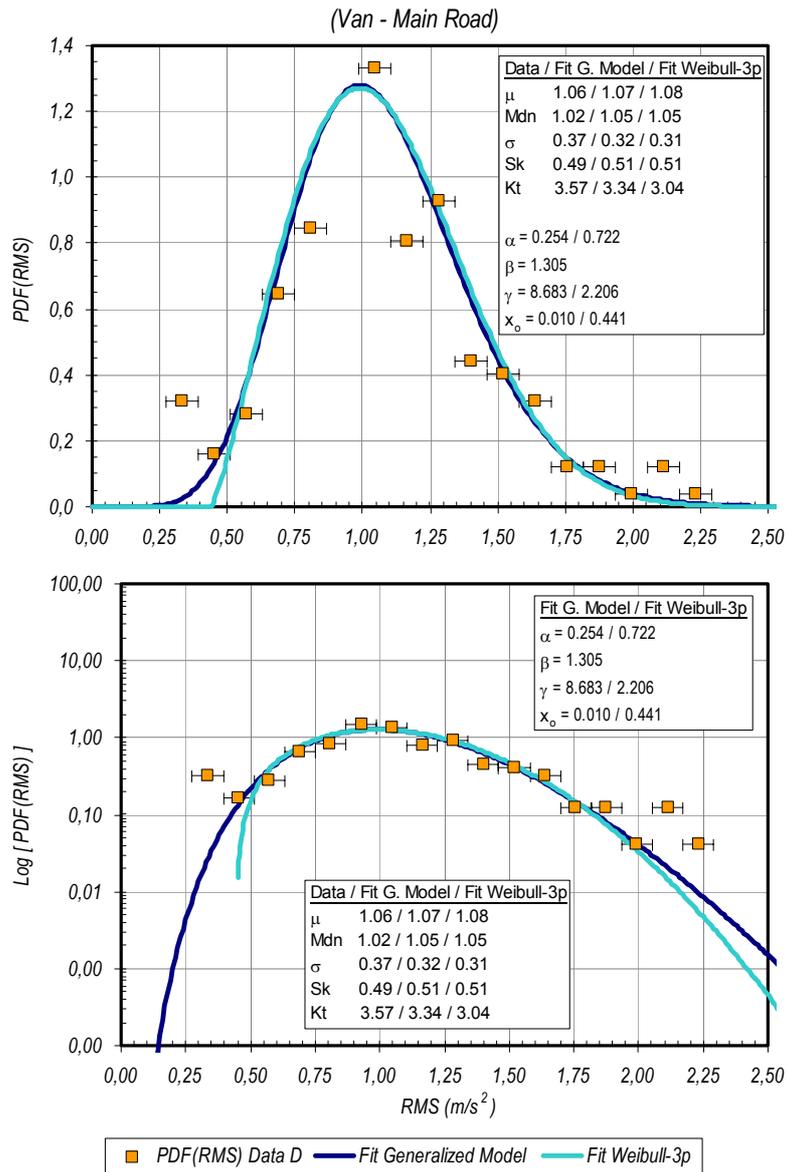


Figura 7.38. Ajuste de la función de densidad de probabilidad del registro-Data-D con el nuevo modelo simplificado y el modelo de tres parámetros de Weibull

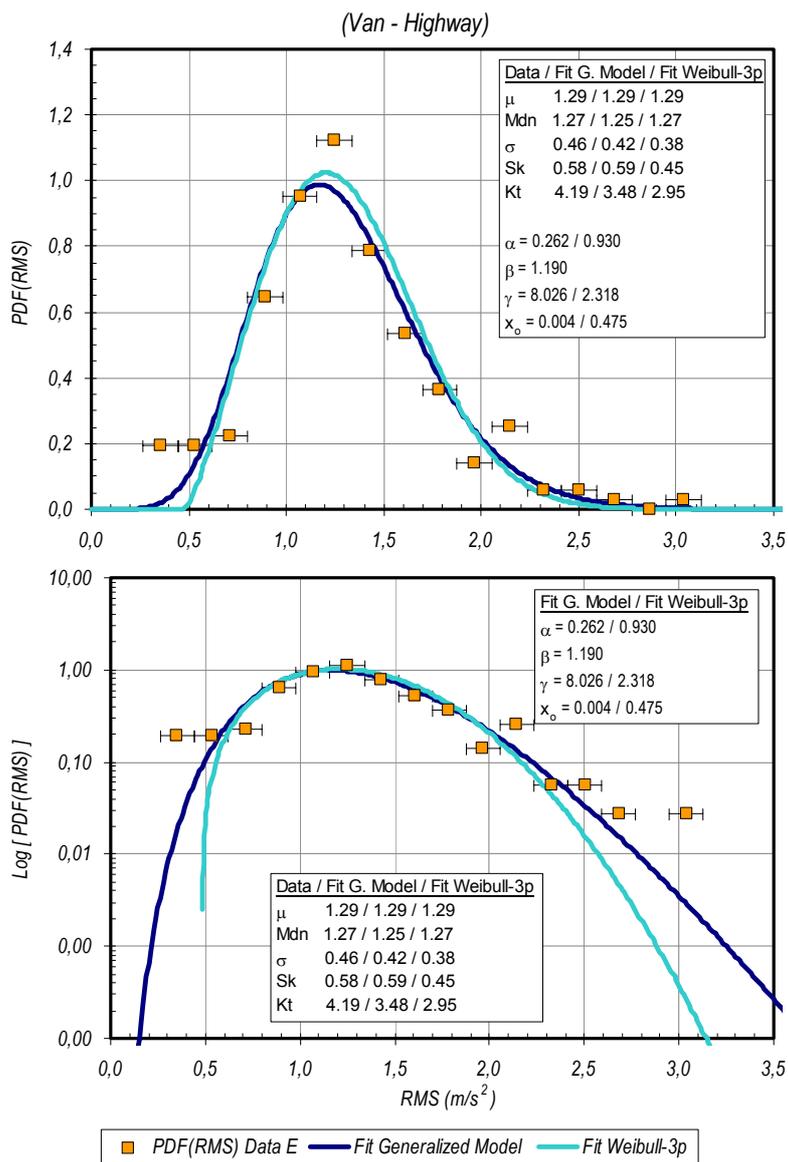


Figura 7.39. Ajuste de la función de densidad de probabilidad del registro-Data-E con el nuevo modelo simplificado y el modelo de tres parámetros de Weibull

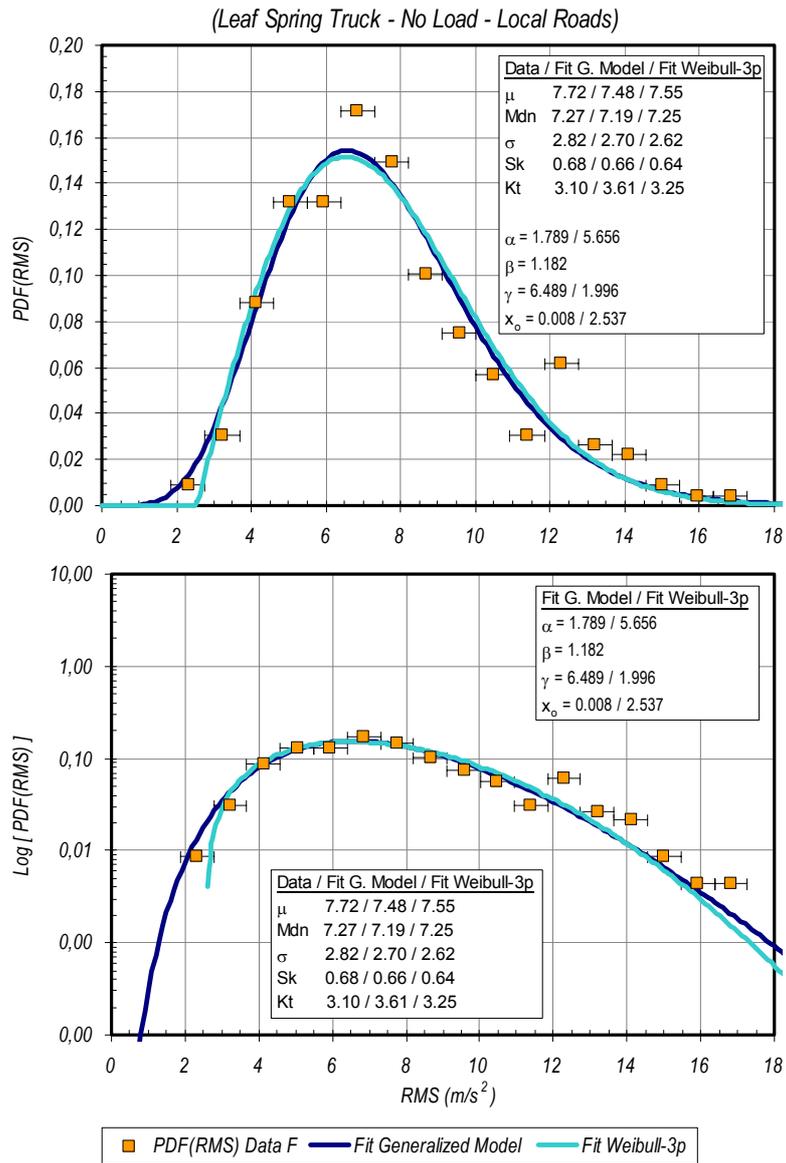


Figura 7.40. Ajuste de la función de densidad de probabilidad del registro-Data-F con el nuevo modelo simplificado y el modelo de tres parámetros de Weibull

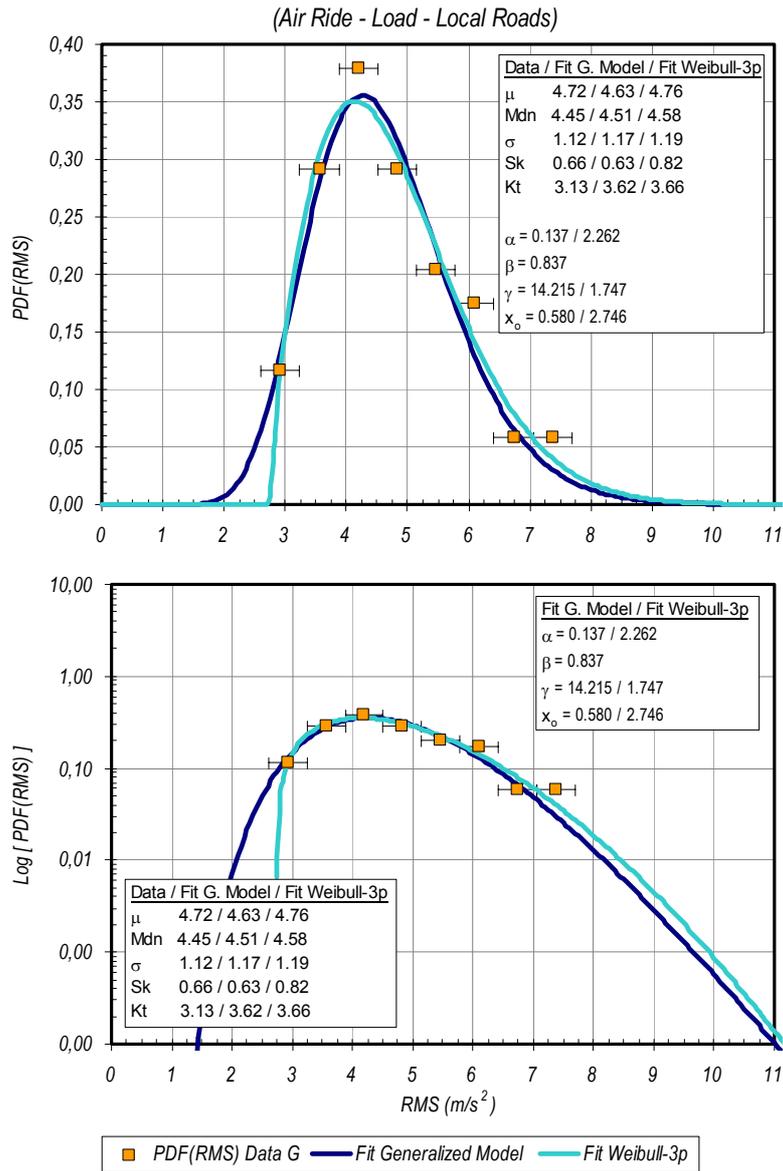


Figura 7.41. Ajuste de la función de densidad de probabilidad del registro-Data-G con el nuevo modelo simplificado y el modelo de tres parámetros de Weibull

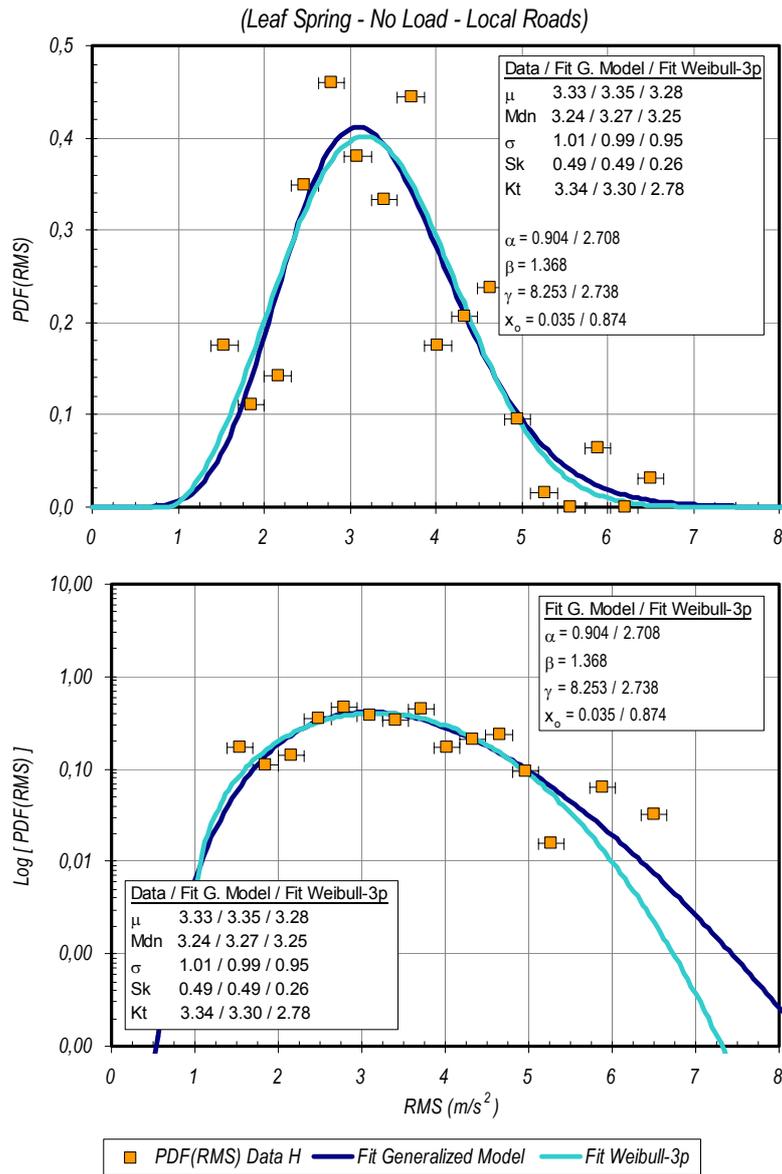


Figura 7.42. Ajuste de la función de densidad de probabilidad del registro-Data-H con el nuevo modelo simplificado y el modelo de tres parámetros de Weibull

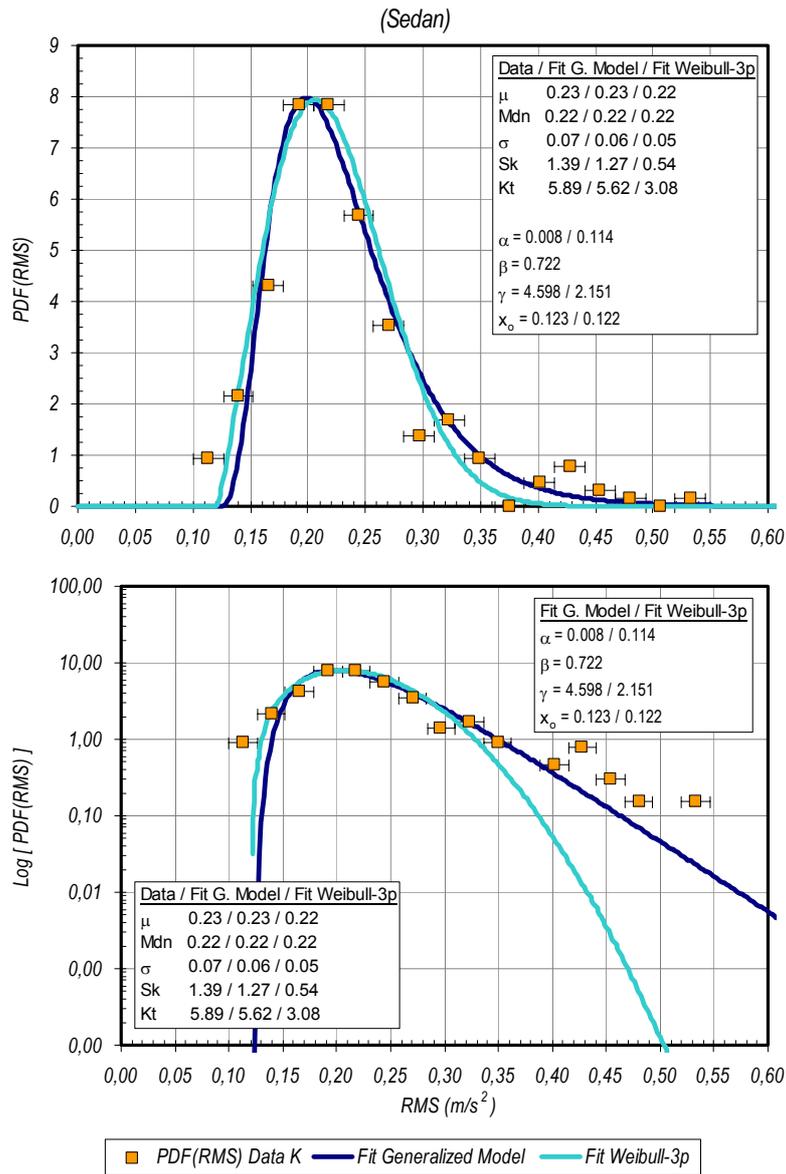


Figura 7.43. Ajuste de la función de densidad de probabilidad del registro-Data-K con el nuevo modelo simplificado y el modelo de tres parámetros de Weibull

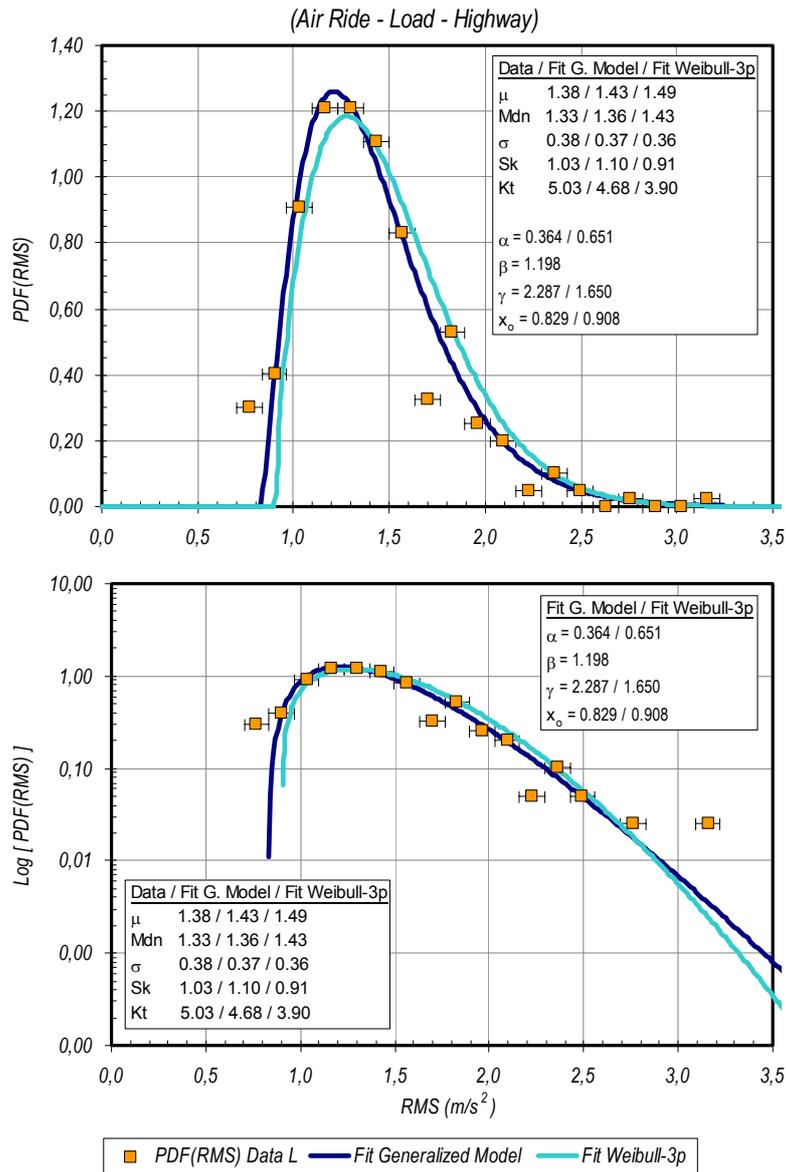


Figura 7.44. Ajuste de la función de densidad de probabilidad del registro-Data-L con el nuevo modelo simplificado y el modelo de tres parámetros de Weibull

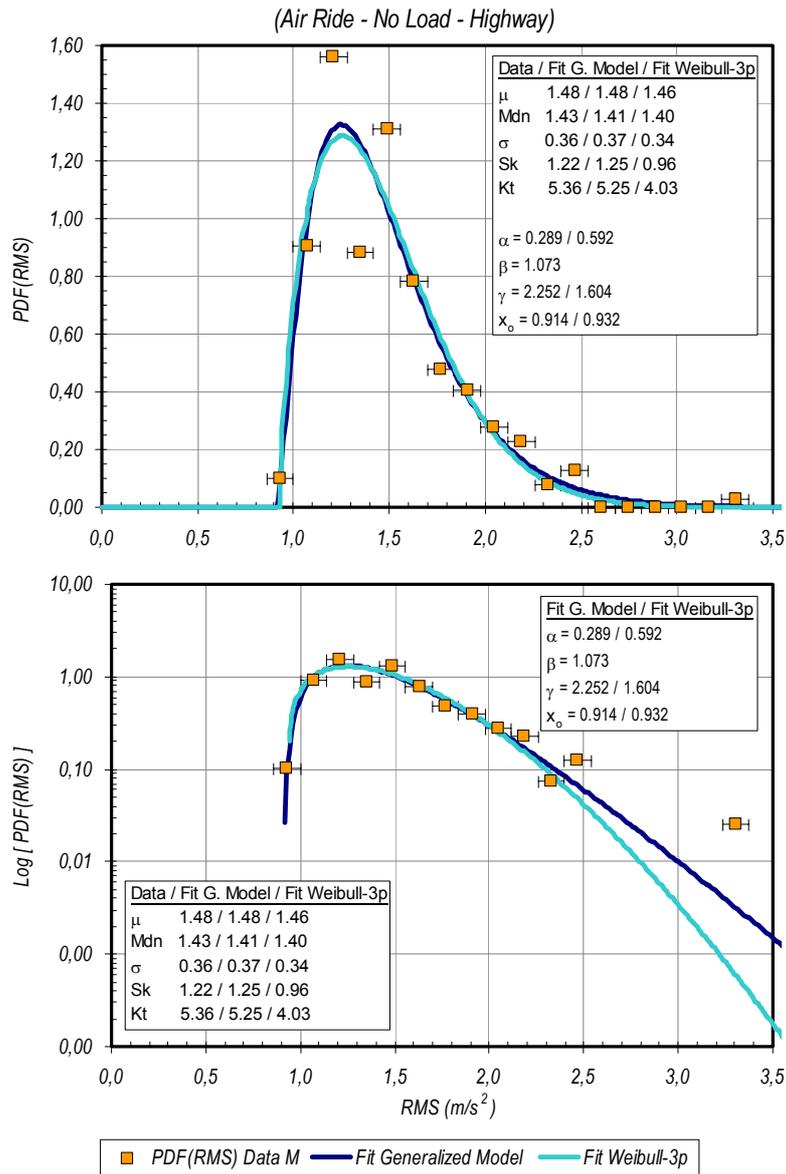


Figura 7.45. Ajuste de la función de densidad de probabilidad del registro-Data-M con el nuevo modelo simplificado y el modelo de tres parámetros de Weibull

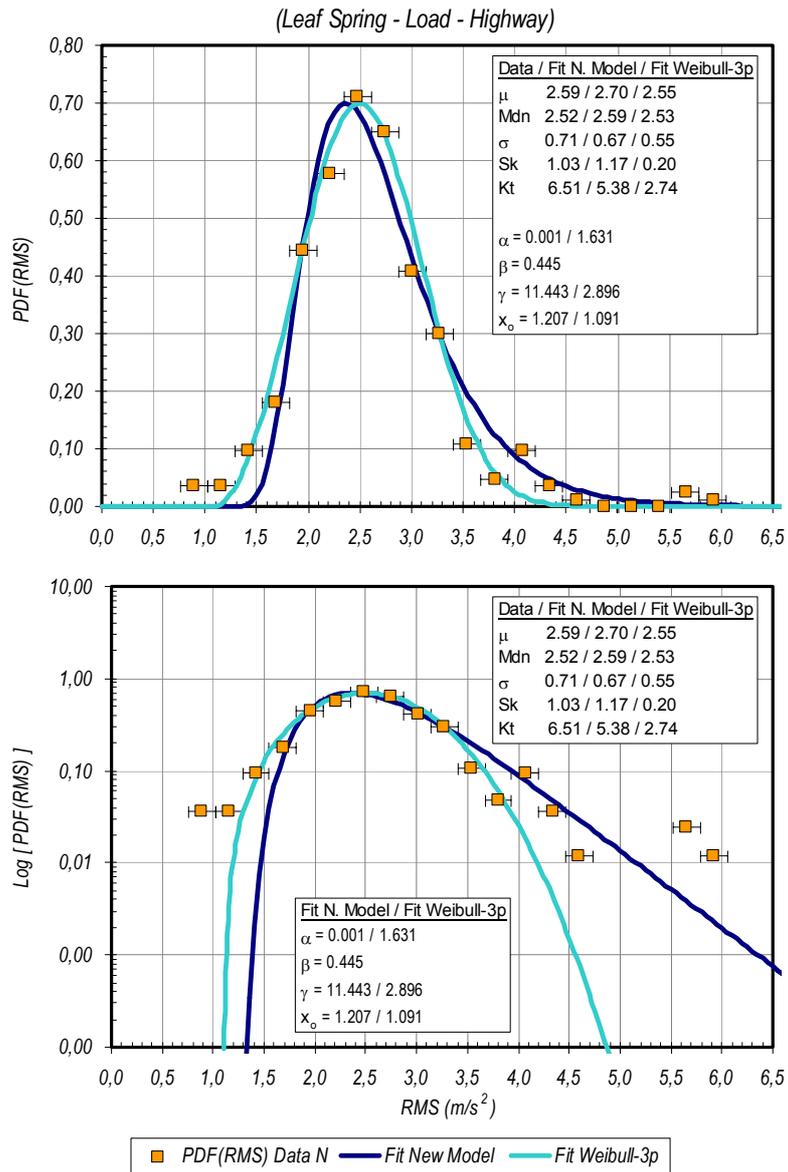


Figura 7.46. Ajuste de la función de densidad de probabilidad del registro-Data-N con el nuevo modelo simplificado y el modelo de tres parámetros de Weibull

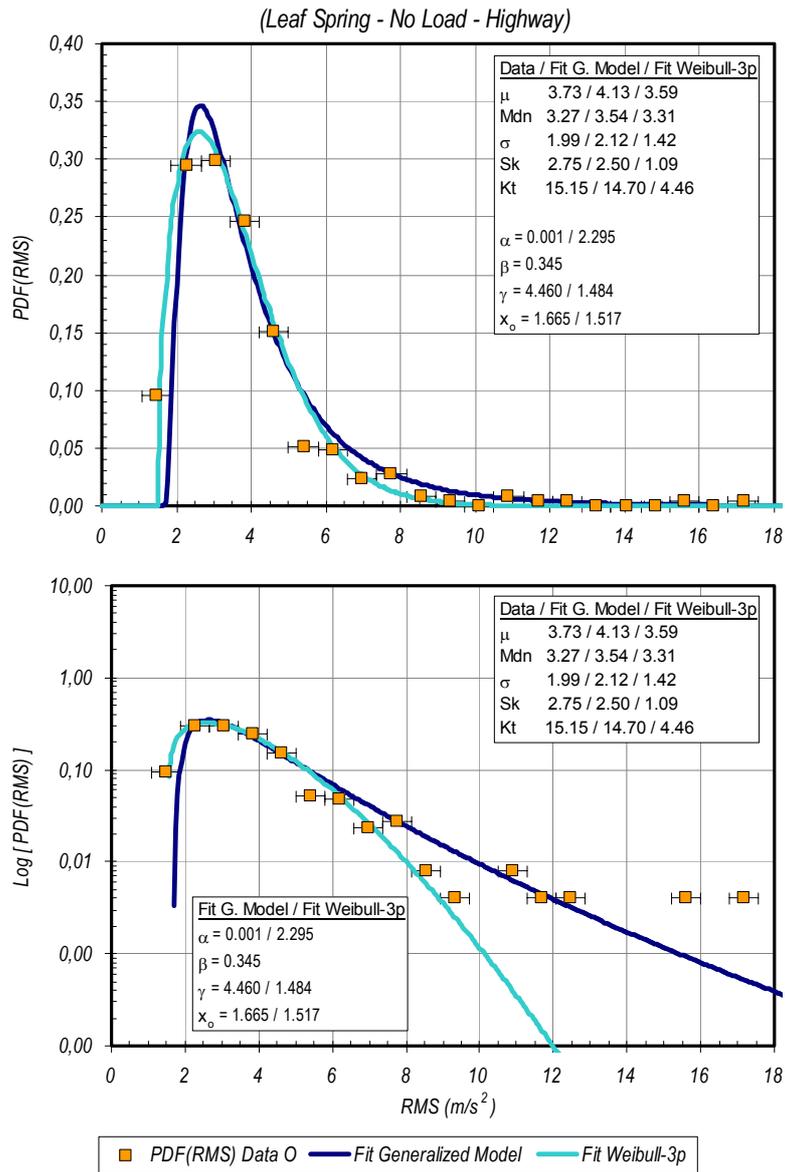


Figura 7.47. Ajuste de la función de densidad de probabilidad del registro-Data-O con el nuevo modelo simplificado y el modelo de tres parámetros de Weibull

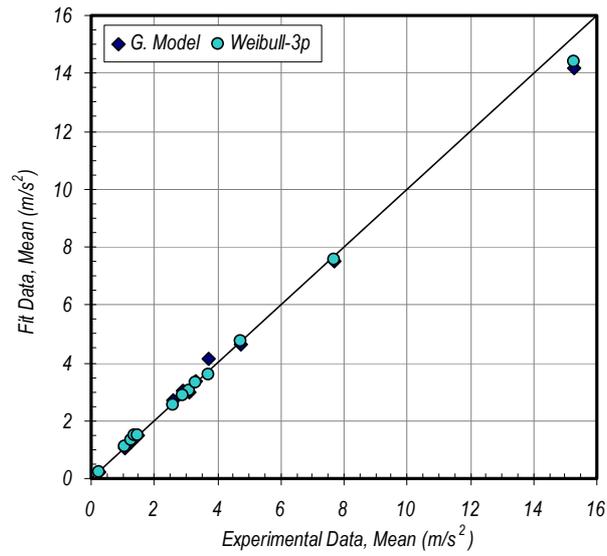


Figura 7.48. Bondad de ajuste para el parámetro estadístico “Media” de la función de densidad de probabilidad de los registros analizados aplicando el nuevo modelo simplificado y el de tres parámetros de Weibull

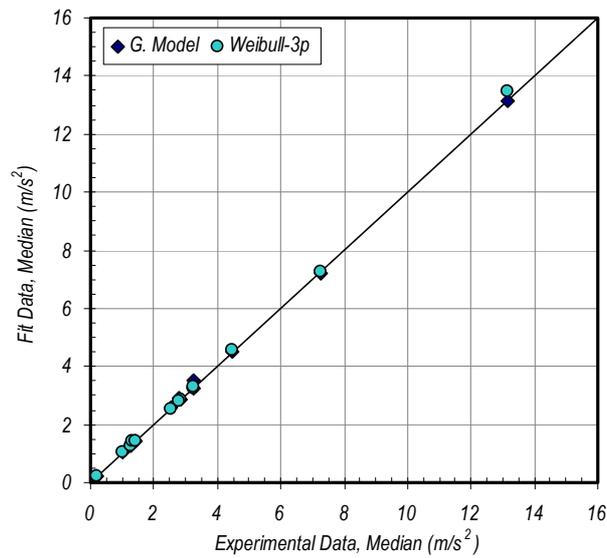


Figura 7.49. Bondad de ajuste para el parámetro estadístico “Mediana” de la función de densidad de probabilidad de los registros analizados aplicando el nuevo modelo simplificado y el de tres parámetros de Weibull

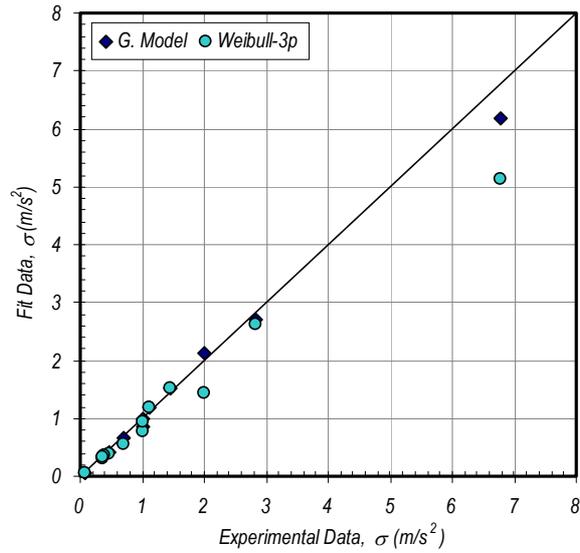


Figura 7.50. Bondad de ajuste para el parámetro estadístico “Desviación estándar” de la función de densidad de probabilidad de los registros analizados aplicando el nuevo modelo simplificado y el de tres parámetros de Weibull

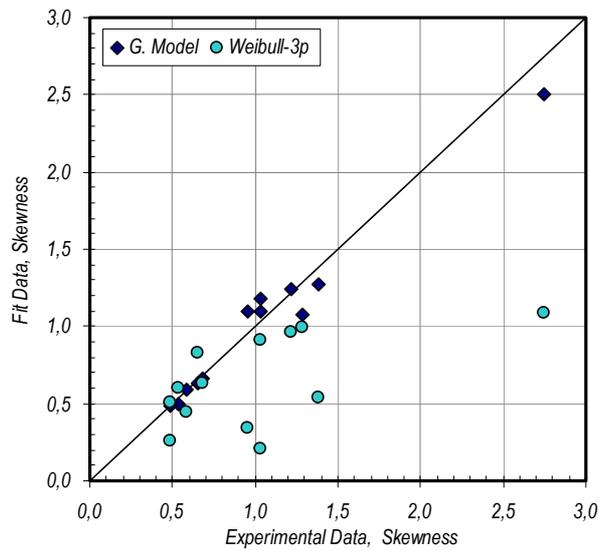


Figura 7.51. Bondad de ajuste para el parámetro estadístico “Coeficiente de asimetría o Skewness” de la función de densidad de probabilidad de los registros analizados aplicando el nuevo modelo simplificado y el de tres parámetros de Weibull

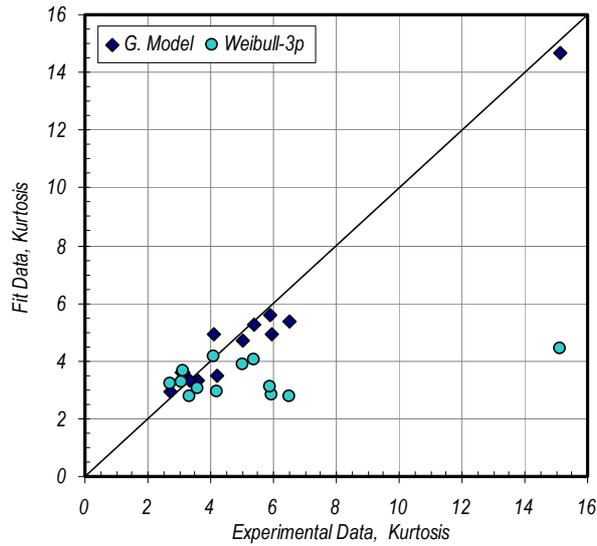


Figura 7.52. Bondad de ajuste para el parámetro estadístico “Coeficiente de curtosis o Kurtosis” de la función de densidad de probabilidad de los registros analizados aplicando el nuevo modelo simplificado y el de tres parámetros de Weibull

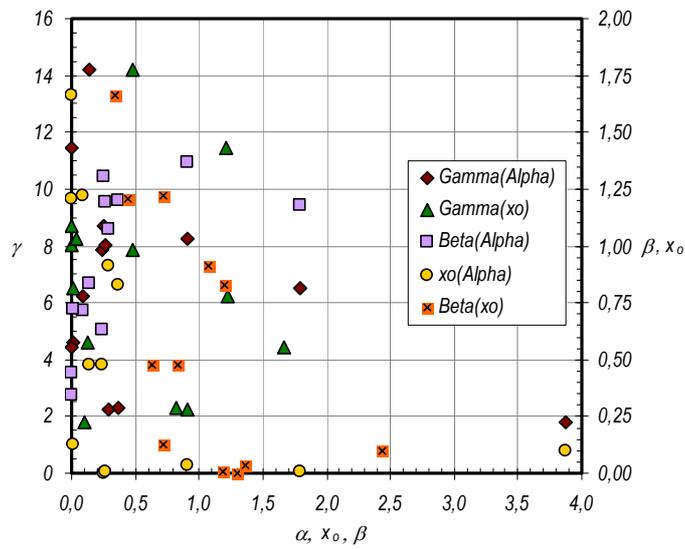


Figura 7.53. Relación de independencia entre los parámetros del nuevo modelo simplificado

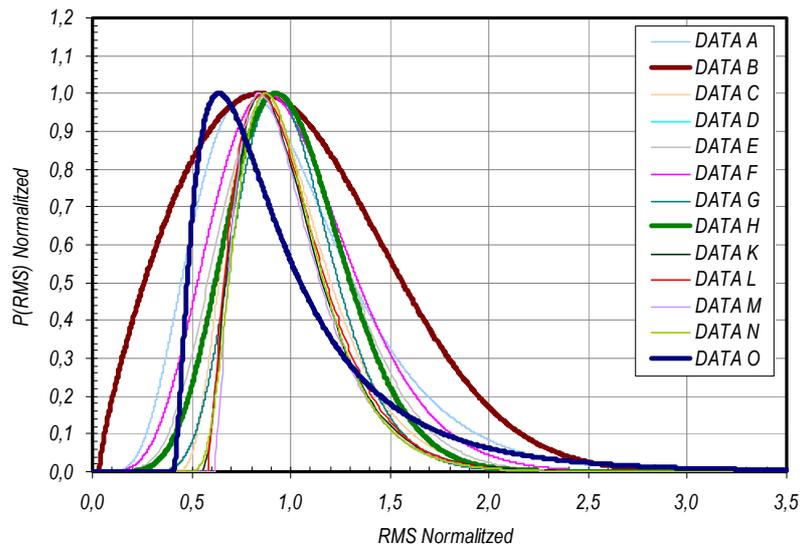


Figura 7.54. Funciones de densidad de probabilidad de los 13 registros ajustadas con el nuevo modelo simplificado y normalizadas en ambos ejes

## 7.6. ARTÍCULO 6. Efecto de la compresión inicial en material de amortiguamiento de cartón ondulado en las características de atenuación ante repetitivos impactos.

Los resultados obtenidos en la investigación, correspondiente al presente artículo, se describen a continuación.

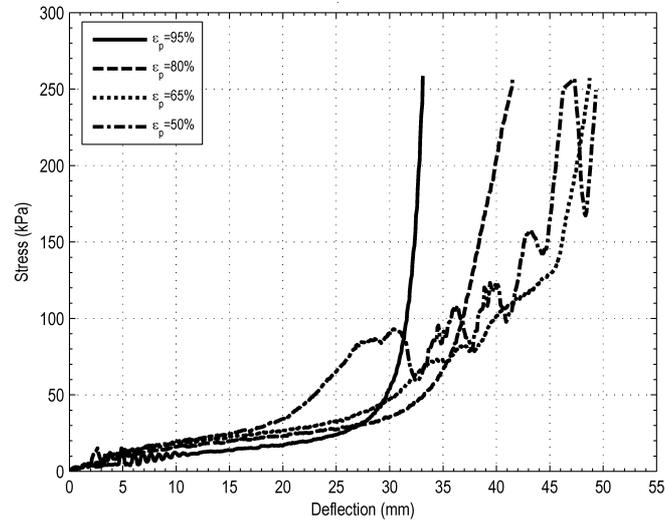


Figura 7.55. Efecto de la deformación inicial,  $\epsilon_p$ , en las características de compresión (velocidad de compresión de 250 mm/s) en material de amortiguamiento Corrupad®

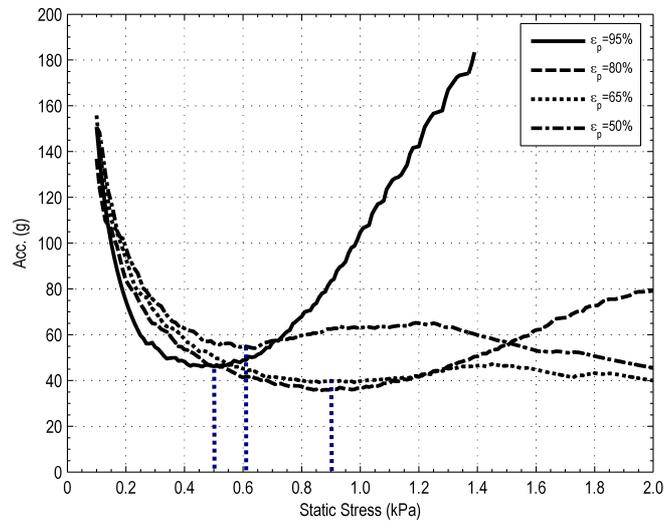


Figura 7.56. Curvas de amortiguamiento obtenidas mediante el método de Sek (2000) y tensión estática adoptada para los ensayos de impacto

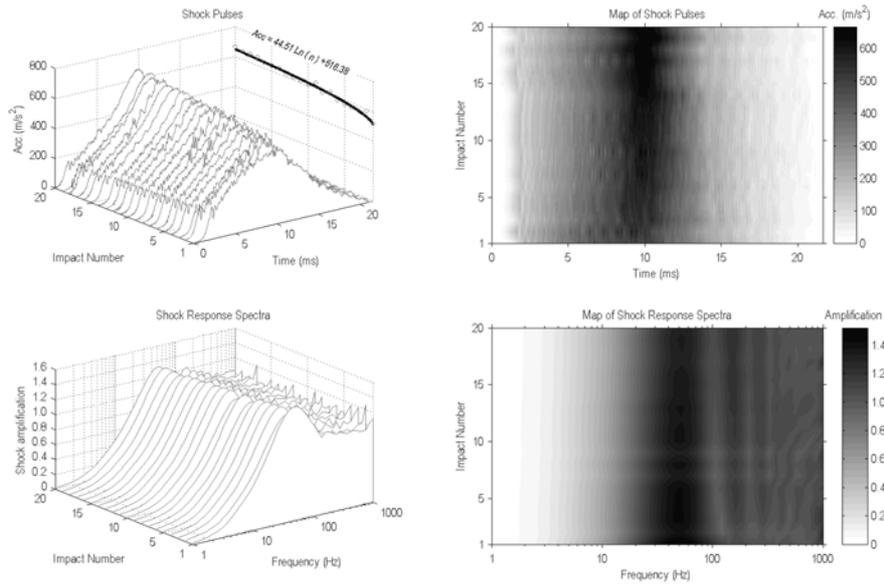


Figura 7.57. Efecto de los 20 impactos sucesivos de la primera serie sobre una muestra de Corrupad® con una deformación inicial de  $\epsilon_p = 50\%$

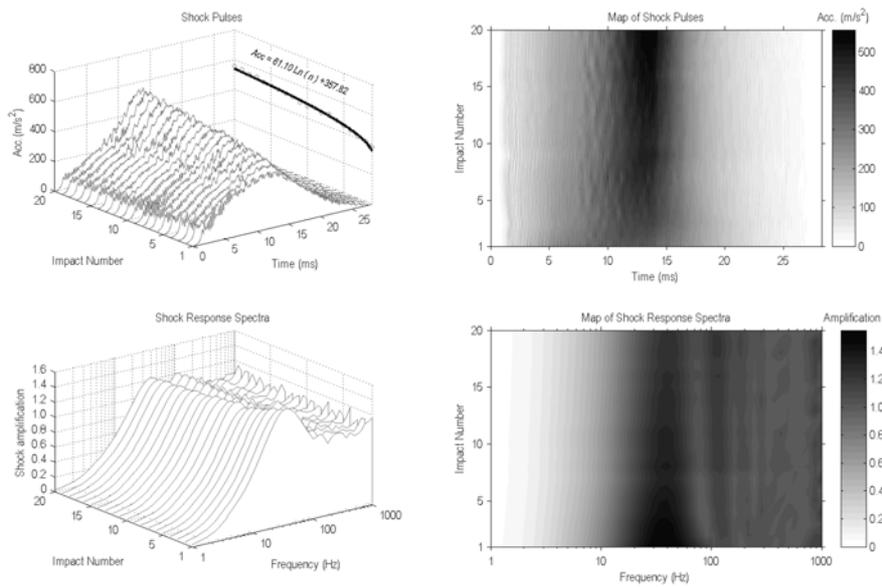


Figura 7.58. Efecto de los 20 impactos sucesivos de la primera serie sobre una muestra de Corrupad® con una deformación inicial de  $\epsilon_p = 65\%$

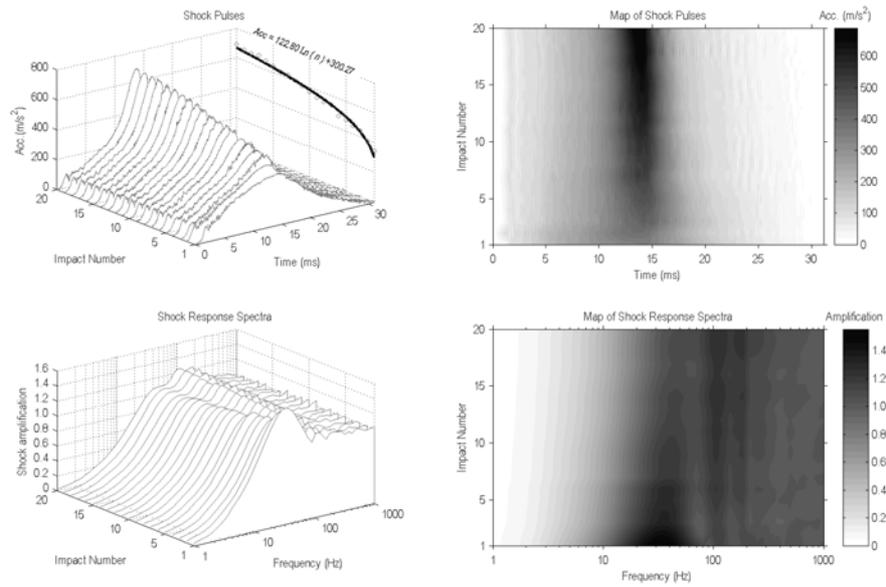


Figura 7.59. Efecto de los 20 impactos sucesivos de la primera serie sobre una muestra de Corrupad® con una deformación inicial de  $\epsilon_p = 80 \%$

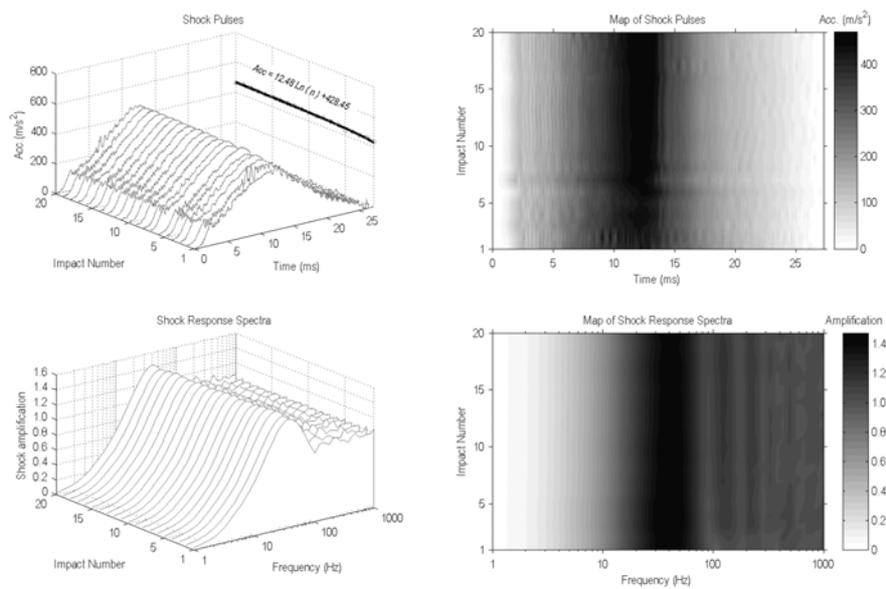


Figura 7.60. Efecto de los 20 impactos sucesivos de la primera serie sobre una muestra de Corrupad® con una deformación inicial de  $\epsilon_p = 95 \%$

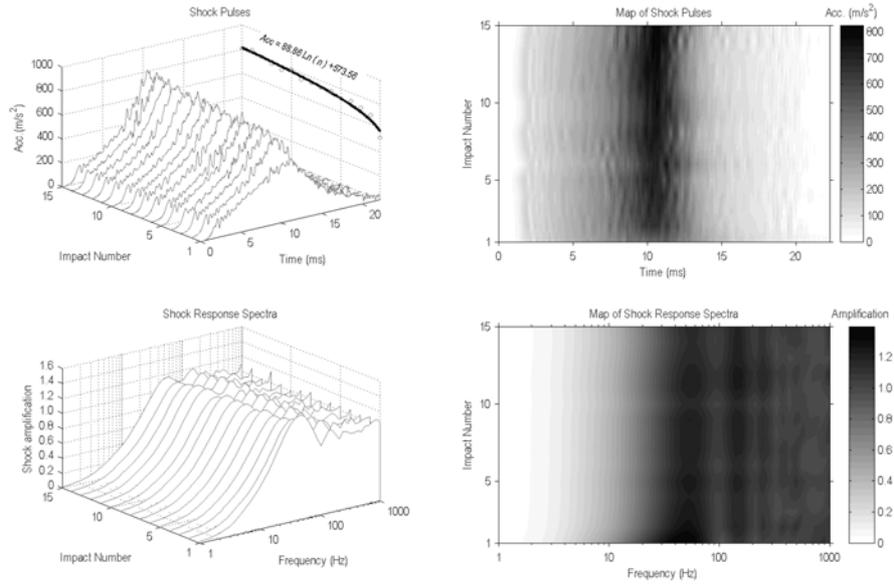


Figura 7.61. Efecto de los 15 impactos sucesivos de la segunda serie sobre una muestra de Corrupad® con una deformación inicial de  $\epsilon_p = 50\%$

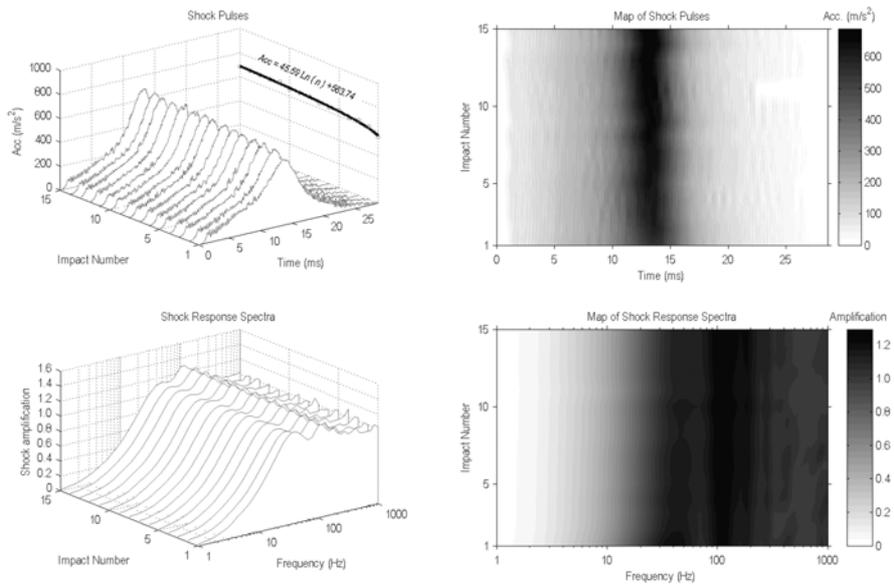


Figura 7.62. Efecto de los 15 impactos sucesivos de la segunda serie sobre una muestra de Corrupad® con una deformación inicial de  $\epsilon_p = 65\%$

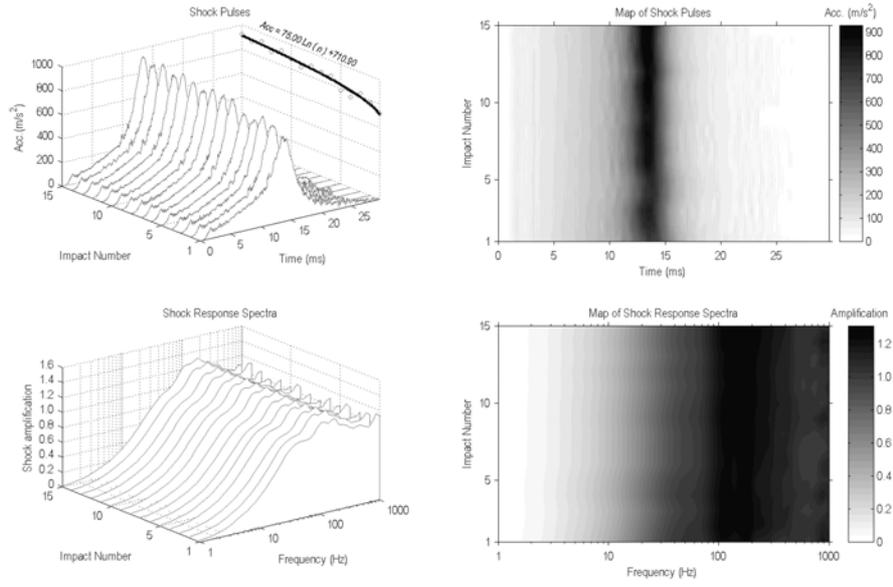


Figura 7.63. Efecto de los 15 impactos sucesivos de la segunda serie sobre una muestra de Corrupad® con una deformación inicial de  $\epsilon_p = 80\%$

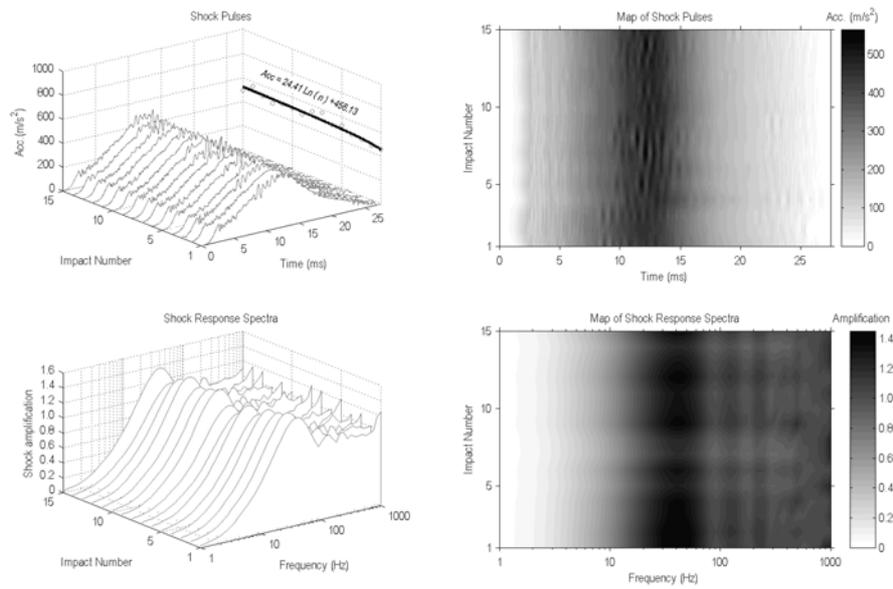


Figura 7.64. Efecto de los 15 impactos sucesivos de la segunda serie sobre una muestra de Corrupad® con una deformación inicial de  $\epsilon_p = 95\%$

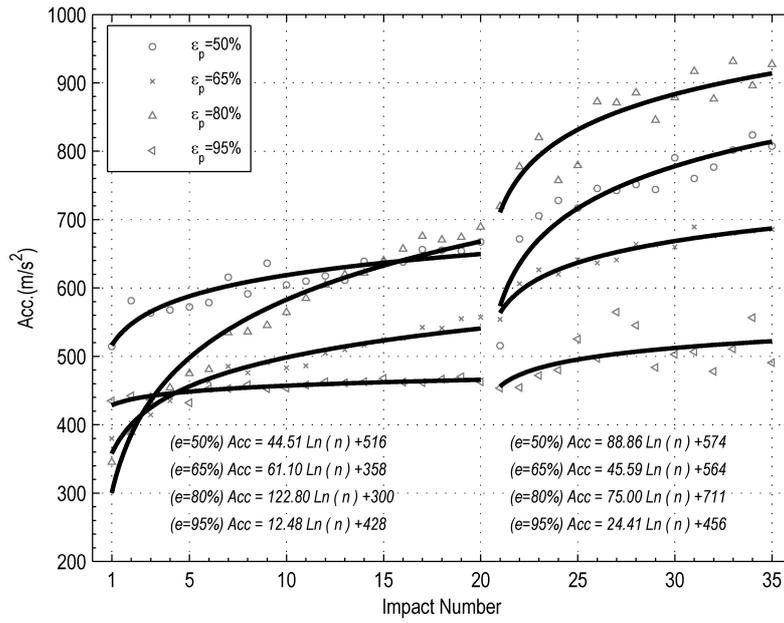


Figura 7.65. Variación de la máxima aceleración tras impactos consecutivos versus deformación inicial,  $\epsilon_p$ , aplicada a la muestra de Corrupad®

# 8 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

---

En este capítulo se repasará brevemente el contraste, tanto de las hipótesis de trabajo como de las principales, planteadas en las investigaciones realizadas de la presente tesis doctoral y se discutirá acerca de su alcance y sus limitaciones.

## 8.1. DISCUSIÓN.

Es importante dentro del campo de la ingeniería del embalaje, profundizar cada vez más en la generación de nuevo conocimiento y mejorar las técnicas actuales de simulación de los riesgos transmitidos al producto y su embalaje en los procesos de transporte y distribución. El nivel y la naturaleza del abuso mecánico aplicado al producto embalado durante el proceso de transporte y distribución (en los cuales los impactos, las vibraciones producidas por el vehículo y las compresiones dinámicas son los más importantes), la precisión de los métodos de estimación de la altura equivalente a impactos obtenidos en el entorno de distribución, metodologías para simular en el laboratorio el proceso de transporte y distribución de la forma más realista posible y el comportamiento de

materiales de amortiguamiento más respetuosos con el medio ambiente ante impactos repetitivos, son cuestiones importantes en las que se ha investigado y se debe seguir investigando en el futuro.

El segundo artículo se ha centrado en la obtención y análisis de los niveles de vibración que se transmite a la mercancía en el transporte por carretera en España, permitiendo el desarrollo de métodos más reales de simulación del transporte por carretera en laboratorio, en función de la carga, el tipo de suspensión y la velocidad del vehículo.

La síntesis precisa de vibraciones producidas por vehículos en carretera requiere que el proceso sea profundamente estudiado, y a su vez, cuente con una medida lo más exacta posible. Igualmente, el procedimiento de medida depende de la naturaleza y complejidad del proceso. Aunque las vibraciones verticales en vehículos pueden ser fácilmente medibles, la variabilidad del proceso y la falta de control de los parámetros medidos, hacen difícil, sino imposible, obtener registros que sean típicos de las vibraciones producidas por vehículos en todas las carreteras. Es necesario llevar a cabo un elevado número de registros de vibraciones, obtenidos bajo diversas condiciones, para obtener estimaciones estadísticas razonables. Las vibraciones producidas por vehículos dependen en gran medida de variables como el nivel de carga utilizada en la plataforma de carga, el tipo de suspensión neumática o mecánica de la plataforma del vehículo y de la velocidad que el vehículo está desarrollando en ese momento, como se ha demostrado en el segundo artículo de investigación de la presente tesis tras el análisis de los datos obtenidos en carreteras españolas, obteniendo funciones PSD que dependían, en general, de esas variables.

Las técnicas que se siguen utilizando en estos días para simulación en laboratorio de vibraciones de vehículos en carretera dependen en gran parte de seleccionar una función PSD de vibración que sea la idónea de entre diversas fuentes. La falta de información en niveles de vibración requiere el uso de niveles RMS de vibración esperados, los cuales pueden o no, ser representativos de un determinado entorno de distribución. Las normas ASTM, ISTA e ISO representan la función PSD general de camiones basadas en medias de registros de vibración medidos a lo largo de un determinado número de clases de suspensión, carga, velocidad y superficie de la carretera. Afirman que los perfiles PSD de ensayo, figuras 2.9 y 2.10, son proporcionados únicamente con propósito de informar, y no pretenden describir de forma precisa un entorno de transporte o distribución específico y que además los ensayos de vibración aleatoria

deberían ser basados en registros de campo representativos. A pesar de esto, las curvas de la figura 2.10 son recomendadas como espectros de ensayo, con intensidad y duración, en la norma ASTM D4169-01. Las especificaciones de las normas ASTM D4728-01 y D4169-01, y en particular el espectro general para camiones con el nivel de seguridad II, es quizás el comúnmente más utilizado procedimiento de ensayos para validación y desarrollo de embalajes a lo largo de todo el mundo (Kipp, 2000b).

Debido a que se ha demostrado en la presente tesis que es posible obtener una función PSD cuya forma depende exclusivamente de los medios de transporte utilizados, y el nivel de energía de la velocidad con la que el vehículo se desplaza, deberíamos de volcar nuestros esfuerzos en analizar y sintetizar los niveles RMS de vibración esperados según la velocidad del vehículo en próximas investigaciones. La principal limitación de utilizar el PSD como un solo descriptor de las vibraciones producidas por vehículos en carretera es que los procesos aleatorios de vibración a ser simulados son asumidos normalmente-distribuidos (Gaussian) y estacionarios de ahí que sean caracterizados con la función media PSD la cual también indica un nivel RMS medio. Esto, por descontado, ofrece ventajas significativas en términos de compactación de datos, como también, el de ser compatible con el proceso utilizado para sintetizar señales aleatorias normalmente-distribuidas de una única función espectral que representa la función media PSD del proceso. Sin embargo, no reproduce la no-estacionariedad del proceso vibratorio. Rouillard y Sek (2000a) propusieron una técnica de simulación que reproduce las variaciones de amplitud del proceso siempre que se conozca la distribución de la raíz del valor medio al cuadrado (RMS) de la señal de vibración. Por ello, el artículo quinto de investigación se ha centrado en la obtención de un nuevo modelo matemático que describe con mayor precisión la distribución estadística de las vibraciones aleatorias generadas por vehículos en carretera y que permite a su vez el desarrollo de ensayos de simulación en laboratorio que incluyan la generación de vibraciones aleatorias de diversos niveles de energía.

Otro abuso mecánico importante, aplicado al producto embalado durante el proceso de transporte y distribución, son los impactos o caídas a los que son sometidos los productos embalados. El primer artículo de investigación se ha centrado en la medida y análisis de estos impactos recibidos por productos embalados que son enviados por avión mediante empresas transportistas de paquetería (DHL y FedEx) entre Europa y USA, obteniendo datos necesarios para simular en laboratorio las

condiciones intercontinentales del transporte de paquetería para el correcto diseño de los embalajes de protección.

La industria del envío de paquetes es uno de los sectores del transporte y la logística más crecientes tanto en América como en Europa. De ahí que sea importante comprender los movimientos físicos que las mercancías embaladas realizan en este entorno de distribución que incluye diversos modos de transporte desde el fabricante hasta el consumidor. Desde que las mercancías embaladas son enviadas utilizando varios medios de transporte, ha habido un esfuerzo creciente en medir y analizar los eventos dinámicos que los productos embalados deben soportar en un determinado entorno de distribución.

La severidad de los impactos a menudo se describe en función de su altura de caída-libre equivalente (EDH) (Brandenburg y June-Ling-Lee, 2001) y de la orientación del impacto, para así facilitar los ensayos de caída en laboratorio. El enfoque generalmente utilizado es utilizar un paquete que contiene un registrador de aceleraciones y procesar los datos obtenidos para obtener una distribución estadística de las alturas de caída esperadas en el proceso de distribución. Es por ello que el artículo tercero de investigación se ha centrado en obtener el método de estimación de la EDH más preciso, el cual se consigue cuando está basado en el uso del parámetro del cambio total de velocidad durante el impacto. Los métodos basados en la velocidad de impacto para el cálculo de la EDH no deberían de ser utilizados debido al elevado error que introducen en su estimación.

Es importante el estimar los ambientes de distribución de forma correcta, puesto que los embalajes de amortiguamiento que sirven de protección a los productos en los procesos de transporte y distribución, son calculados y diseñados teniendo en cuenta la altura máxima de caída esperada, la cual es obtenida mediante estimación de la EDH. Debido al impacto negativo medioambiental de los materiales utilizados como amortiguamiento de productos embalados, tales como el poliestireno expandido, está habiendo un creciente interés en uno de los materiales más disponible y renovable, el papel, como sustituto. En la comunidad científica todavía tienen dudas de que estos materiales basados en el papel sean capaces de mantener sus propiedades de amortiguamiento tras una sucesión de impactos repetitivos. La disponibilidad del cartón ondulado es abundante, pero en su forma original se comporta de manera muy pobre como material de amortiguamiento. Gordon (1972) fue el primero en investigar las características como material de amortiguamiento del cartón ondulado multi-capa. Relevantes investigaciones han sido realizadas en los últimos

años por Sek (1999), Sek y Kikpatrick (2001), Sek y Rouillard (2005 y 2006) proponiendo una mejora en el diseño de estos materiales como materiales de amortiguamiento. En el artículo sexto de investigación se ha demostrado que materiales de amortiguamiento desarrollados con cartón ondulado precomprimido multi-capa es una alternativa factible como protección de los productos ante impactos repetitivos frente a los materiales poliméricos menos respetuosos con el medio ambiente puesto debido a su excelente comportamiento ante sucesivos impactos en cuanto aceleración máxima transmitida y respuesta en frecuencia del material.

Otro abuso mecánico importante, aplicado al producto embalado durante el proceso de transporte y distribución, es la compresión dinámica a la que son sometidos los embalajes. El cuarto artículo de investigación se ha centrado en la obtención de un método mediante el cual se pueda cuantificar la aptitud de un embalaje de cartón ondulado para soportar cargas dinámicas de compresión por largos periodos de tiempo. Actualmente no hay establecido un método por el cual se pueda medir la capacidad que tiene un embalaje de cartón ondulado en soportar cargas dinámicas de compresión por periodos largos, Sek y Rouillard (1993), Rouillard y Sek (2000b). Se ha demostrado, no obstante, que el daño acumulado en embalajes de cartón ondulado sometidos continuamente a cargas de compresión dinámicas aleatorias, puede ser obtenido mediante la evaluación de los parámetros modales del sistema extraídos de su función de respuesta en frecuencia.

## 8.2. CONCLUSIONES.

Las hipótesis de la presente tesis doctoral han sido contrastadas mediante el diseño de los diferentes experimentos y posterior evaluación de resultados de los seis trabajos de investigación correspondientes a las publicaciones incluidas en el compendio que se adjunta (Anexo).

Para una mejor comprensión de este apartado, a continuación se repasa brevemente el contraste, tanto de las hipótesis de trabajo como de las principales, planteadas en las investigaciones realizadas de la presente tesis doctoral:

**HP1.0= Los niveles de vibración producidos por vehículos de transporte de mercancías por carreteras dependen del nivel de carga utilizado, la velocidad del vehículo y el tipo de suspensión del vehículo utilizado.**

La hipótesis principal de trabajo HP1.0 se corrobora a partir de los resultados mostrados en las figuras 7.3-7.12. En las figuras 7.9-7.12 se representan las funciones PSD según la velocidad, el tipo de vehículo y la carga utilizada. En las figuras 7.3, 7.4 y 7.5 se muestran las distribuciones acumuladas (CDF) del nivel de vibraciones RMS(G), del nivel máximo de aceleración PEAK(G) y del cociente entre estos dos niveles CREST FACTOR, ajustados en un modelo modificado de cuatro parámetros de Weibull para cada tipo de vehículo utilizado y velocidad. En las figuras 7.6, 7.7 y 7.8 se muestran los valores medios de los niveles de vibraciones, máxima aceleración y factor de cresta, según tipo de vehículo y carga utilizada. De todas estas figuras se aprecia que los niveles de vibración producidos por vehículos de transporte de mercancías por carreteras dependen del nivel de carga utilizado, la velocidad del vehículo y el tipo de suspensión del vehículo utilizado.

**HT1.1= En vibraciones producidas por vehículos de transporte de mercancías por carreteras los niveles de vibración, RMS(G), se incrementan al incrementarse la velocidad del vehículo.**

Esta hipótesis de trabajo queda demostrada tal y como puede observarse en la figura 7.3. Concretamente en esta figura se representa la distribución acumulada (CDF) del nivel de vibraciones RMS(G), ajustada a un modelo modificado de cuatro parámetros de Weibull. Se puede observar fácilmente que, tanto para vehículos con suspensión neumática como para los de ballesta, los niveles de vibración RMS(G) se incrementan al incrementarse la velocidad del vehículo.

**HT1.2= En vibraciones producidas por vehículos de transporte de mercancías por carreteras los niveles de vibración máxima, PEAK(G), se incrementan al incrementarse la velocidad del vehículo.**

La hipótesis de trabajo HT1.2 se corrobora observando la figura 7.4. En esta figura se representa la distribución acumulada (CDF) del nivel máximo de aceleración PEAK(G), ajustada a un modelo modificado de cuatro parámetros de Weibull. Se aprecia que, tanto para vehículos con suspensión neumática como para los de ballesta, los niveles de vibración máxima PEAK(G) se incrementan al incrementarse la velocidad del vehículo.

**HP2.0= Los niveles de vibración producidos por vehículos de transporte de mercancías en las carreteras españolas son menores que los niveles establecidos por las normas ASTM, ISTA e ISO para ensayo en laboratorio.**

La hipótesis principal de trabajo HP2.0 se corrobora a partir de comparar las funciones PSD mostradas en las figuras 7.13-7.16, con las figuras 2.8 y 2.10 correspondientes a las funciones PSD que las normas ISO 13355 y ASTM D4728 recomiendan como espectros de ensayo en laboratorio, respectivamente.

**HP3.0= Es posible desarrollar una función PSD escalable en función de la velocidad del vehículo.**

Esta hipótesis principal de trabajo HP3.0 es corroborada de forma trivial a través de demostrar la hipótesis de trabajo HT3.1. Puesto que la función PSD que determina las frecuencias predominantes en el espectro de vibraciones producidas por vehículos en carretera es invariante ante el cambio de velocidad del vehículo, como se demuestra en la hipótesis de trabajo HT3.1, se puede obtener una función PSD, con nivel de RMS igual a la unidad, figuras 7.17 y 7.19, representativa del espectro en frecuencia producido por las vibraciones de un determinado vehículo independientemente de la velocidad. Para obtener la función PSD del vehículo caracterizado por la función PSD escalable para una velocidad determinada, sólo será necesario multiplicar la función PSD escalable por el valor RMS correspondiente a esa velocidad, figuras 7.18 y 7.20.

**HT3.1= La forma de la función PSD que determina las frecuencias predominantes en el espectro de vibraciones producidas por vehículos en carretera es invariante ante el cambio de velocidad del vehículo.**

La hipótesis de trabajo HT3.1 se corrobora observando las figuras 7.9-7.12. En estas figuras se representan las funciones PSD según la velocidad, el tipo de vehículo y la carga utilizada. Para cada figura (un mismo vehículo y carga utilizada) las frecuencias predominantes coinciden para los tres grupos de velocidades representados.

**HP4.0= A partir de la distribución estadística de Weibull de tres parámetros se puede generar un nuevo modelo de cuatro parámetros que describe de forma más precisa el carácter estadístico de las vibraciones aleatorias generadas por vehículos en carretera.**

La hipótesis principal de trabajo HP4.0 se corrobora a partir de las figuras 7.35-7.53. Las figuras 7.35-7.47 muestran los ajustes por mínimos cuadrados de la función de densidad de probabilidad de trece registros de vibraciones producidas por vehículos y carreteras distintas. Los ajustes por mínimos cuadrados en estas figuras, aplicando el algoritmo de la figura 5.24, fueron realizados con el nuevo modelo simplificado desarrollado (ecuación 7.1), y con el modelo de tres parámetros de Weibull (ecuación 5.6). Más concretamente, en las figuras 7.48-7.52, se muestra la bondad de los ajustes para cada uno de los cinco parámetros estadísticos, media, mediana, desviación estándar, coeficiente de asimetría (skewness) y coeficiente de curtosis (kurtosis). De ellos se deduce que para los parámetros proporcionales al tercer y cuarto momento central de la distribución (coeficiente de asimetría y de curtosis) el nuevo modelo desarrollado describe de forma más precisa el carácter estadístico de las vibraciones aleatorias generadas por vehículos en carretera, ya que mejora de forma importante los resultados del modelo de tres parámetros de Weibull.

**HT4.1= Los cuatro parámetros de la nueva distribución estadística de las vibraciones aleatorias generadas por vehículos en carretera son independientes entre ellos.**

Esta hipótesis de trabajo queda demostrada tal y como puede observarse en la figura 7.53. Concretamente en esta figura se representa la relación de independencia de los parámetros del nuevo modelo, dos a dos, para cada uno de los trece registros de vibraciones de vehículos en carretera analizados. La independencia de los parámetros del nuevo modelo, también puede deducirse de la observación de la figura 7.34. En ella se muestra, la influencia de cada uno de los cuatro parámetros en la definición de distintos aspectos de la forma de la nueva distribución estadística para vibraciones aleatorias.

**HT4.2= La nueva distribución estadística de las vibraciones aleatorias generadas por vehículos en carretera reproduce las siguientes distribuciones conocidas (Rayleigh, Chi-Square, Exponencial, Gamma, Pearson tipo III, Weibull de dos y tres parámetros)**

La hipótesis de trabajo HT4.2 se corrobora observando la tabla 7.8. En esta tabla se muestran los valores que ha de tomar cada uno de los parámetros del nuevo modelo para reproducir las distribuciones estadísticas conocidas Rayleigh, Chi-Square, Exponencial, Gamma, Pearson tipo III, Weibull de dos y tres parámetros.

**HP5.0= Los impactos producidos en los entornos de distribución internacional por vía aérea entre USA y España por las compañías DHL y FedEx no presentan diferencias apreciables.**

Esta hipótesis es cierta para un nivel de probabilidad menor del 95% de altura máxima de caída. Sin embargo DHL con etiqueta de fragilidad obtuvo menor altura máxima de caída que FEDEX. Puesto que para ensayos en laboratorio para la simulación de estos entornos de distribución, se suele utilizar el 95% o a veces el 90% en el diseño de embalajes, para estos niveles de probabilidad se puede corroborar que no se presentan diferencias apreciables entre DHL y FEDEX (Figura 7.1, tabla 7.2 y figura 7.2). La hipótesis realmente corroborada sería la siguiente; los impactos producidos en los entornos de distribución internacional por vía aérea entre USA y España por las compañías DHL y FedEx no presentan diferencias apreciables para los niveles de probabilidad utilizados en la simulación en laboratorio.

**HT5.1= El entorno de distribución internacional entre USA y España por las compañías DHL y FedEx, es menos severo que el entorno de distribución nacional de USA.**

La hipótesis de trabajo HT5.1 se corrobora comparando el último estudio realizado por Singh et al (2006) con la tabla 7.2. De la comparación se obtiene que el entorno de distribución internacional con DHL es un 24% menos severo que el doméstico de USA y con FedEx un 11% menos severo.

**HT5.2= La utilización de etiquetas de aviso de producto frágil no resulta eficaz en la reducción del número de impactos y de altura de caída máxima esperada en los envíos internacionales por vía aérea entre USA y España por las compañías DHL y FedEx.**

Esta hipótesis es cierta para un nivel de probabilidad menor del 95% de altura máxima de caída. Sin embargo DHL con etiqueta de fragilidad obtuvo menor altura máxima de caída que sin ella. Puesto que para ensayos en laboratorio para la simulación de estos entornos de distribución, se suele utilizar el 95% o a veces el 90% en el diseño de embalajes, para estos niveles de probabilidad se puede corroborar que no se presentan diferencias apreciables entre usar o no etiquetas de fragilidad en DHL y FEDEX (Figura 7.1, tabla 7.2 y figura 7.2). La hipótesis realmente corroborada sería la siguiente; la utilización de etiquetas de aviso de producto frágil no resulta eficaz en la reducción del número de impactos y de altura de caída máxima esperada en los envíos internacionales por vía aérea entre USA y España por las compañías DHL y FedEx para los niveles de probabilidad utilizados en la simulación en laboratorio.

**HP6.0= Los errores medios más bajos en la estimación de la EDH se obtiene con los métodos de cálculo basados en el uso del parámetro del cambio total de velocidad durante el impacto.**

La hipótesis principal de trabajo HP6.0 se corrobora a partir de los valores mostrados en las tablas 7.5-7.6, y en las figuras 7.22-7.23 y 7.25. En estas figuras y tablas se muestran los errores en la estimación de la EDH según los métodos descritos en la figura 5.11. Los métodos n°3 y n°4, basados en el uso del cambio total de velocidad durante el impacto, son los que presentan errores medios más bajos.

**HT6.1= Los métodos de cálculo basados en el uso del parámetro del cambio total de velocidad durante el impacto, producen menor variación en el coeficiente de restitución en el proceso de calibración.**

La hipótesis de trabajo HT6.1 se corrobora observando la figura 7.24. En esta figura se representa la variación en los coeficientes medios de calibración y/o restitución (c) y (e) para cada método y grupo de orientación de impacto (arista, cara, esquina). Se aprecia que, para los métodos n°3 y n°4, basados en el parámetro del cambio total de velocidad

durante el impacto, el coeficiente de restitución presenta menor variación que los demás métodos.

**HT6.2= Para obtener un error bajo en la estimación de la EDH no es necesario tener en cuenta la orientación del impacto producido en el proceso de calibración del coeficiente de restitución.**

En la figura 7.25 se representa la variación en los errores de las EDH estimadas para cada método, ya sea teniendo en cuenta la orientación del impacto como no teniéndola, en el proceso de calibración del coeficiente de restitución. Se puede observar que sin tener en cuenta la orientación del impacto producido en el proceso de calibración del coeficiente de restitución, el error medio y su variación en la estimación de la EDH es muy similar a si se tiene en cuenta la orientación del impacto, obteniéndose el mismo orden de error en ambos casos, con lo cual se corrobora la hipótesis de trabajo HT6.2.

**HP7.0= Un material de amortiguamiento basado en el papel puede ser utilizado para comportarse de manera similar ante múltiples impactos que otros materiales de amortiguamiento basados en el petróleo.**

Es bien sabido que los materiales de amortiguamiento basados en el petróleo, como por ejemplo el poliestireno expandido (EPS), ante múltiples impactos no presentan prácticamente incremento en la aceleración máxima que transmiten y su respuesta en frecuencia se mantiene. Observando las figuras 7.60 y 7.64, se demuestra que un material basado en el cartón ondulado, como es el Corrupad®, aplicándole una deformación inicial del 95% se comporta de manera similar a uno derivado del petróleo, ya que se mantiene prácticamente sin crecimiento la aceleración máxima transmitida tras sucesivos impactos y su respuesta en frecuencia se mantiene prácticamente invariante, corroborándose así la hipótesis principal HP7.0.

**HT7.1= El comportamiento de materiales de amortiguamiento multi-capa de cartón ondulado en términos de aceleración máxima amortiguada tras múltiples impactos es más estable cuanto mayor es el estado inicial de precompresión o deformación ejercido sobre la muestra.**

La hipótesis de trabajo HT7.1 se corrobora observando la figura 7.65. En esta figura se representa la variación de la máxima aceleración tras

múltiples impactos consecutivos según la deformación inicial,  $\epsilon_p$ , aplicada a la muestra de cartón ondulado multi-capa, Corrupad®. Se observa que, al ir incrementándose la deformación inicial aplicada a las muestras la pendiente de la curva se va decreciendo, incrementándose cada vez menos la aceleración máxima que transmite la muestra ante impactos sucesivos.

**HT7.2= La respuesta en frecuencia ante un choque en materiales de amortiguamiento multi-capa de cartón ondulado precomprimidos o deformados inicialmente, no varía significativamente después de una treintena de impactos sucesivos.**

En las figuras 7.57-7.64 viene representada la evolución de la respuesta en frecuencia del material de amortiguamiento multi-capa de cartón ondulado, ante múltiples impactos sucesivos, para cada nivel de deformación inicial aplicada. En ellas se observa que los mapas de respuesta en frecuencia no muestran variación apreciable a lo largo de los sucesivos impactos a los que la muestra es sometida, corroborándose así la hipótesis de trabajo HT7.2.

**HP8.0= Se puede detectar el daño acumulado en embalajes de cartón ondulado sometidos continuamente a cargas de compresión dinámicas aleatorias mediante la evaluación de los parámetros modales del sistema extraídos de su función de respuesta en frecuencia.**

La hipótesis principal de trabajo HP8.0 se corrobora a partir de los resultados mostrados en las figuras 7.29-7.31. En las figuras 7.30 y 7.31 se representa la evolución de los parámetros modales para cajas de cartón ondulado sometidas a compresión dinámica aleatoria. En la figura 7.29 se representa la evolución de la respuesta en frecuencia (FRF) de una caja de cartón ondulado sometida a esa fatiga. Por lo tanto, es cierto que se puede detectar el daño acumulado en embalajes de cartón ondulado sometidos continuamente a cargas de compresión dinámicas aleatorias mediante la evaluación de los parámetros modales del sistema extraídos de su función de respuesta en frecuencia.

**HP8.1= La inducción de daño a embalajes de cartón ondulado por la aplicación de cargas estáticas de compresión de creciente magnitud es discernible mediante cambios en la frecuencia de resonancia del sistema.**

La hipótesis de trabajo HT8.1 se corrobora observando las figuras 7.27 y 7.28. En esta figura se representa el cambio en la rigidez dinámica y estática tras la aplicación de cargas de compresión de creciente magnitud (calculado según el procedimiento mostrado en la figura 5.18 y 5.20). Es fácilmente observable en estas figuras 7.27 y 7.28, como el cambio en la rigidez estática relativa de un embalaje de cartón ondulado sometido a cargas estáticas de compresión de creciente magnitud (figura 7.26), es discernible mediante cambios en la rigidez dinámica relativas, la cual como se observa en la definición de la figura 5.18, es directamente proporcional a la frecuencia de resonancia del sistema.

**HT8.2= La evolución de la fatiga en el embalaje de cartón ondulado se manifiesta por una ligera pendiente decreciente en los parámetros modales.**

En las figuras 7.30 y 7.31 viene representada la evolución de los parámetros modales del sistema, amortiguamiento y rigidez dinámica, para cajas de cartón ondulado que han sido sometidas a compresión dinámica aleatoria. En ellas se observa como la evolución de la fatiga de la muestra ensayada, antes de producirse el daño, se manifiesta mediante ligeras pendientes decrecientes de los parámetros modales, corroborándose así la hipótesis de trabajo HT8.2.

**HT8.3= El inminente daño en el embalaje de cartón ondulado se manifiesta por un cambio brusco en las pendientes de los parámetros modales.**

La hipótesis de trabajo HT8.3 se corrobora observando las figuras 7.30 y 7.31. En estas figuras la pendiente decreciente de los parámetros modales cambia bruscamente al producirse el daño.



# 9

## DESARROLLOS FUTUROS

---

Los trabajos realizados en la presente tesis han servido para contrastar las hipótesis planteadas y conseguir así alcanzar los objetivos establecidos. De los resultados obtenidos y de las propias limitaciones de lo aportado, surgen nuevas líneas de investigación destinadas a mejorar y completar lo realizado en primera instancia, y en última, a seguir avanzando en el campo de la ingeniería del embalaje y mejorar las técnicas actuales de simulación de los riesgos transmitidos al producto y su embalaje en los procesos de transporte y distribución. Así, a continuación se comentan de forma esquemática, los estudios que se deberían realizar en un futuro para alcanzar ese objetivo.

En cuanto a la mejora de las técnicas de simulación de vibraciones producidas por vehículos en carretera, se propone:

- Analizar y sintetizar los niveles RMS de vibración esperados según la velocidad del vehículo en distintas carreteras y con otros vehículos, debido a que se ha demostrado en la presente tesis que es posible obtener una función PSD cuya forma depende

exclusivamente de los medios de transporte utilizados, y el nivel de energía de la velocidad con la que el vehículo se desplaza.

- Mejorar el algoritmo de obtención de los parámetros del nuevo modelo de distribución estadística de las vibraciones de vehículos en carretera, frente a un ajuste de mínimos cuadrados, para acortar tiempo de cálculo y solventar los problemas de convergencia. en el algoritmo de detección de parámetros.
- Mejorar el método inicial propuesto en el año 2000 por Rouillard y Sek, relativo a la producción de una señal aleatoria modulada que es similar en carácter a una modulación natural de vibraciones en vehículos no-estacionaria, incorporando el nuevo modelo estadístico de distribución de la raíz del valor medio al cuadrado (RMS) de la señal de vibración, desarrollado en la presente tesis.
- Estudiar la influencia de los parámetros de configuración de registradores de vibraciones en la distribución estadística de la raíz del valor medio al cuadrado (RMS) de la señal de vibración obtenida en vehículos por carretera.

En cuanto a la mejora de las técnicas de simulación de impactos y caídas sufridas por productos y sus embalajes en procesos de transporte y distribución, se propone:

- Desarrollar un método o algoritmo, que independientemente de la superficie de impacto, estime con mayor precisión la EDH (effective drop height), puesto que a día de hoy el error en las estimaciones deducido en la presente tesis sólo es valido cuando la superficie de impacto es la misma que la superficie de calibración.

En cuanto a la mejora de las técnicas de monitorización de los procesos de fatiga, ante cargas dinámicas aleatorias, en materiales de cartón ondulado, se propone:

- Estudiar las diferencias de comportamiento en dicha fatiga de muestras o embalajes de cartón ondulado fabricado con fibras vírgenes y fibras recicladas.
- Estudiar como afectan parámetros como por ejemplo, la humedad relativa, el nivel RMS de excitación y la carga estática aplicada, en la monitorización del comportamiento de dicha fatiga, ante cargas dinámicas aleatorias, de muestras o embalajes de cartón ondulado.

En cuanto a la mejora del comportamiento de materiales de amortiguamiento más respetuosos con el medio ambiente como sustitutos de los materiales derivados del petróleo no biodegradables, se propone:

- Estudiar el efecto de la humedad en el comportamiento de materiales de amortiguamiento fabricados con papel o cartón ondulado multi-capa, frente a múltiples impactos.



# 10

## REFERENCIAS

- 
- Anon J, 1996. State of the Industry report. Flexible Packaging association.
- Annual Book of ASTM Standards, 2006. American Society of Testing and Materials, West Conshohocken, PA, Vol. 15.09.
- Bendat J.S, Piersol A.G, 1986. Random data analysis and measurement procedures. John Wiley and Sons, New York.
- Brandenburg R, June-Ling-Lee J, 2001. Fundamentals of Packaging Dynamics. L.A.B.
- Caldicott P.J, 1991. Distribution testing – Sine or Random. International Journal of Packaging Technology and Science, 4, pp 287 – 291.
- Cartwright D.E, Longuet-Higgins M.S, 1956. The statistical distribution of the maxima of a random function. Proc. of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences, Vol. 237, No. 1209, 212-232.

- Charles D, 1993. Derivation of Environment Descriptions and Test Severities from Measured Road Transportation Data. *Journal of the Institute of Environmental Sciences*, UK. Jan-Feb pp 37 – 42.
- Chonhenchob V, Sittipod S, Pratheepthinthong S, Rachtanapun P, Singh S.P, 2006. Measurement and Analysis of Distribution Environment in Thailand: the case of produce distribution. *Proceedings of 15th IAPRI World Conference on Packaging*, 26-30.
- Doebbling S.W, Farrar C.R, Prime M.B, Shevitz D.W, 1996. Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems From Changes in Their Vibration Characteristics: A Literature Review. Los Alamos National Laboratory report LA-13070-MS.
- Foley J.T, 1972. Transportation dynamics environment summary. Scandia laboratory report No. EDB 1354 (also SC-M-72 0076).
- Forristall G.Z, 1978. On the Statistical Distribution of the Heights of Sea Waves. *J. Geophysical Res.*, 83, C5.
- Goda Y, 1974. Estimation of Wave Statistics from Spectral Information. *Proceedings of the Intl. Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis*. ASCE, New Orleans, 320-337.
- Godshall W.D, 1971. Frequency Response, Damping and Transmissibility Characteristics of Top Loaded Corrugated Cases. *USDA Fed. Res. Paper FPL 160*.
- Goff J, 1974. Development of performance standards for parcel post packages. Project N° 3108. Michigan State University: East Lansing, MI.
- Gordon G, 1972. Assessment of the shock-reducing properties of corrugated fibreboard. *International Conference on Packaging Technology*, Pira/IAPRI, pp 36:1-15.
- Gordon G.A, 1980. Developing Better Vibration tests for Packages. *Journal of the Soc. of Environmental Engineers*. 29-36.

- Gumbell E.J, 1954. Statistical Theory of Extreme Values and Some Practical Applications. Applied Maths. Series 33. National Bureau of Standards, Washington.
- Holmes J.D, 1998. Wind Loading of Structures: Application of Probabilistic Methods. Construction Research Communications Ltd., ISSN 1365-0556.
- Jarimopas B, Singh S.P, Saengni W, 2005. Measurement and analysis of truck transport vibration levels and damage to packaged tangerines during transit. International Journal of Packaging Technology and Science. 18: 179–188.
- Jenkinson A.F, 1955. The Frequency Distribution of the Annual Maximum (or Minimum) Values of Meteorological Elements. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 81, 158-171
- Kawiecki G, 1998. Feasibility of applying distributed piezotransducers to structural damage detection. J. Intell. Mater. Syst. Struct. 9 189–97.
- Kipp W.I, 1998. Understanding today's transport environment measuring recorders. Presented at the ISA 44th International Instrumentation Symposium.
- Kipp W.I, 2000a. Developments in testing products for distribution. International Journal of Packaging Technology and Science, Vol 13, pp 89 – 98.
- Kipp W.I, 2000b. Vibration Testing Equivalence. Proceedings of the International Safe Transit Association Conference, Orlando, Florida.
- Kirkpatrick J, Sek M.A, 1997. Replacement of polymeric cushioning with corrugated fibreboard - case study. 10th IAPRI World Conference on Packaging, pp 267-276, Melbourne.
- Krunic D, Winterstein S.R, 2000. Probabilistic Modelling of Extreme Wave Crests: A noisy Weibull Model. 8th ASCE Speciality Conference on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability. PCM2000-342.
- Longuet-Higgins M.S, 1952. On the Statistical Distribution of Wave Heights in a Storm. J. Marine Res., XI, 3.

- Longuet-Higgins M.S, 1980. On the Statistical Distribution of the Heights of Sea Waves: some Effects of Non-linearities and Finite Band Width. *J. Geophysical Res.*, C3.
- Melbourne W.H, 1975. Probability Distributions of Response of Bhp House to Wind Action and Model Comparisons. *J. of Industrial Aerodynamics*, 1, 167-175
- Melbourne W.H, 1977. Probability Distributions Associated with the Wind Loading of Structures. *Civil Engineering Transactions*, The Institution of Engineers, Australia, 58-67.
- O'Brien M, 1963. Causes of fruit bruising on transport trucks. *Hilgardia* 35(6), pp 113 – 124.
- Oestergaard S, 1991. Packaging Goals in Transport Quality, 7th IAPRI World Conference on Packaging, Utrecht, the Netherlands.
- Ostrem F.E, Godshall W.D, 1979. An Assessment of the Common Carrier Shipping Environment, General Technical Report, FPL 22, U.S. Department of Agriculture.
- Oxford Economic Forecasting, 2004. The economic impact of express carriers in Europe. October.
- Park M, Regan A, 2004. Issues in emerging home delivery operations. Research Paper. University of California Transportation Center: Los Angeles, CA.
- Pierce C, Singh S.P, Burgess G, 1992. A comparison of leaf spring to air cushion trailer suspensions in the transportation environment. *International Journal of Packaging Technology and Science*. 5: 11–15.
- Randall R.B, 1987. Frequency Analysis. Bruel & Kjaer.
- Rice S.O, 1944. Mathematical Analysis of Ransom Noise. *Bell Tech. J.*, 23
- Richards D.P, 1990. A review of analysis and assessment methodologies for road transportation vibration and shock data. *Environmental Engineering*. Dec, pp 23 – 26.

- Root D, 1997. Six-step method for cushioned package development. Lansmont corp, [www.lansmont.com](http://www.lansmont.com)
- Rossi M.A, Takayama, 2004. Measuring environmental data in the Oruro-Yacuiba route in BOLIVIA to develop testing methods for packaging for future implementation in the laboratory. *Journal of Packaging Science & Technology*, Japan, 13,6:353-360.
- Rouillard V, Sek M.A, 2000a. Monitoring and Simulation of non-stationary vehicle vibrations. *Proceedings of the 20th IAPRI symposium*, San Jose, Cal, USA, pp 78 – 87.
- Rouillard V. and Sek M.A, 2000b. A Frequency Domain Technique for Maintaining Resonance Condition During Sine Dwell Testing of Packages. *International Journal of Packaging Technology and Science*, Vol 13, pp 227 - 232.
- Rouillard V, Sek M.A, 2001. Simulation of Non-stationary vehicle Vibrations. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. Vol 215, Part D, pp 1069 – 1075.
- Rouillard V, Sek M.A, Bruscella B, 2001. Simulation of Road Surface Profiles. *ASCE Journal of Transportation Engineering*, Vol 127 No. 3, pp 247 - 253.
- Rouillard V, 2002. Monitoring, Control and Simulation of Distribution Hazards *Proceedings, Research Seminar on Packaging Innovations*, Food Research and Development Centre, St Hyacinthe, Quebec, Canada.
- Rouillard V, Sek M.A, 2002. Statistical modelling of predicted non - stationary vehicle vibrations. *International Journal of Packaging Technology and Science*, Vol 15 (2), 93-101.
- Rouillard V, Sek M.A, 2003. Generating Road Vibration Test Schedules From Pavement Profiles for Packaging Optimisation. 21 IAPRI Symposium, Valencia-Spain. May.
- Rouillard V, 2006. On the Laboratory Synthesis of Non-stationary Road Vehicle Vibrations. Ph.D Thesis, Monash University, Melbourne, Australia.

- Sandhu A.P.S, Singh S.P, Singh J, Joneson E, 2006. Measurement and analysis of truck and rail shipping environment in India. Published online in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com). DOI: 10.1002/pts.764.
- Sek M.A, Rouillard V, 1993. Resonance Frequency Tracking in Sine Dwell Testing of Packages. Proceedings of the International Association of Packaging Research Institute 8th World Conference on Packaging, Sao Paolo, Vol.1, pp 191 - 197.
- 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, p. 87-94.
- Sek M.A. et al, 1999. Performance characteristics of a paper based material Corrupad® for cushioning applications, 11th IAPRI World Conference on Packaging, pp. 403-415, Singapore.
- Sek M.A, Minett M, Rouillard V, Bruscella B, 2000. A new method for the determination of cushion curves, Int. Journal of Packaging Technology and Science, 13, p. 249-255.
- Sek M.A, 2001. Optimisation of Packaging Design Through an Integrated Approach to the Measurement and Laboratory Simulation of Transportation Hazards. Proceedings of the 12th international Conference on Packaging, International Association of Packaging Research Institutes, Warsaw, Poland.
- Sek M.A, Kirkpatrick J, 2001. Corrugated Cushion Design Manual, Victoria University and Amcor, ISBN 1-86272-598-5.
- Sek M.A, Rouillard V, 2005. Behaviour of multi-layered corrugated paperboard cushioning systems under impact loads, Applied Mechanics and Materials, 3-4, p. 383-388.
- Sek M.A, Rouillard V, Crawford S, Tarash H, 2005. Enhancement of cushioning performance with paperboard crumple inserts. Int. Journal of Packaging Technology and Science, 18, p. 273-278.
- Sek M.A, Rouillard V, 2006. High-speed videographic study of engineered composite paperboard cushioning systems, Proc.15th IAPRI World Conference, Tokyo, Japan, p. 258-262.

- Shen B.S, Tracy M, Roh Y-S, Chang F-K, 1996. Built-in piezoelectrics for processing and health monitoring of composite structures AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Forum (Salt Lake City, UT, April 18–19) pp 390–7.
- Singh S.P, Marcondes J, 1992. Vibration levels in comercial truck shipments as a function of suspension and payload. *Journal Test Evaluation*. 20(6): 466–469.
- Singh S.P, Voss T, 1992. Drop heights encountered in the United Parcel Service small parcel environment in the USA. *Journal of Testing and Evaluation, American Society of Testing and Materials*. 20(5): 382–387.
- Singh S.P, Antle J, Burgess G, 1992. Comparison between lateral, longitudinal and vertical vibration levels in commercial truck shipments. *International Journal of Packaging Technology and Science*. 5: 71–75.
- Singh S.P, Burgess G, Rojnuckarin P, 1995. Test protocol for simulating truck and rail vibration and rail impacts in shipments of automotive engine racks. *International Journal of Packaging Technology and Science*. 8: 33-41.
- Singh S.P, Cheema A, 1996. Measurement and analysis of the overnight small package shipping environment for Federal Express and United Parcel Service. *Journal of Testing and Evaluation, American Society of Testing and Materials*. 24(4): 205–211.
- Singh S.P, Burgess G, Hays Z, 2001. Measurement and analysis of the UPS ground shipping environment for large and heavy packages. *Journal of Testing and Evaluation, American Society of Testing and Materials*. 29.
- Singh S.P, Burgess G, Singh J, 2004. Measurement and analysis of the second-day air small and lightweight package shipping environment within Federal Express. *Packag. Technol. Sci*. 17: 119–127.
- Singh S.P, Burgess G, Singh J, Kremmer M, 2006. Measurement and analysis of the net-day air shipping environment for mid-sized and lightweight packages for DHL, FedEx and United Parcel Service. *Packag. Technol. Sci*. 19: 227–235.

- Singh S.P, Sandhu A, Singh J, Joneson E, 2006. Measurement and Analysis of Global Truck, Rail and Parcel Shipments. Proceedings of 15th IAPRI World Conference on Packaging. 8-11.
- Singh S.P, Joneson E, Singh J, 2006. Measurement and analysis of US truck vibration for leaf spring and air ride suspensions, and development of tests to simulate these conditions. International Journal of Packaging Technology and Science. 19: 309–323.
- Smallwood D.O, 2005. Generating Non-Gaussian Vibration for Testing Purposes. Sound and Vibration, Oct. pp 18-24.
- Socquet-Juglard H, 2005. Spectral Evolution and Probability Distributions of Surface Ocean Gravity Waves and Extreme Waves. Doctor Scientiarum Thesis Dept. of Mathematics, University of Bergen, November.
- Steinwolf, A, Connon, W.H, 2005. Limitations of the Fourier Transform for Describing Test Course Profiles. Sound and Vibration Feb. pp 12-17.
- Tayfun M.A, 1980. Narrow-band Nonlinear Sea Waves. J. Geophysical Res., 85, 1548-1552.
- Thom H.C.S, 1960. Distributions of Extreme Winds in the United States. Journal of the Structural Division, ASCE, 85, 257-265.
- Van Baren P, 2005. The Missing Knob on your Random Vibration Controller. Sound and Vibration, pp 2-7.
- Wing S.P, 1932. Discussion of Wind Bracing in Steel Buildings. Proc. ASCE, 1103
- Zell G, 1969. Vibration Testing of Resilient Package Cushioning Material, Report PA-T-3610, Piccatinny Arsenal, Dover, N.J.
- Yuan S, Dejian Z, Xiangying Z, Tong L, Xiaoshan W, Dawei L, Jun P, 2006. Data acquisition for distribution environment in the region of South-Central of China. Proceedings of 15th IAPRI World Conference on Packaging. 12-18.

# ANEXO

---

A continuación se adjuntan íntegras las seis publicaciones incluidas en el compendio de la presente tesis doctoral. En dichas publicaciones se detallan los experimentos y resultados particulares de cada una de las investigaciones parciales que conforman la tesis doctoral. Como ya se expuso en la justificación de la unidad temática, dichas investigaciones se enfocan en profundizar en la generación de nuevo conocimiento dentro del campo de la ingeniería del embalaje y mejorar las técnicas actuales de simulación de los riesgos transmitidos al producto y su embalaje en los procesos de transporte y distribución. El énfasis se ha puesto en investigar el nivel y la naturaleza del abuso mecánico aplicado al producto embalado durante el proceso de transporte y distribución (en los cuales los impactos, las vibraciones producidas por el vehículo y las compresiones dinámicas son los más importantes), la precisión de los métodos de estimación de la altura equivalente a impactos obtenidos en el entorno de distribución, metodologías para simular en el laboratorio el proceso de transporte y distribución de la forma más realista posible y el comportamiento de materiales de amortiguamiento más respetuosos con el medio ambiente ante impactos repetitivos.