

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**

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, ϵ_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, ε_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