

# Sistema de Atenuación de Impacto en Aterrizaje Paracaídas Comandado Autónomo para Entrega de Cargas Proyecto PIDDEF 038/14

11 de abril de 2018



Nombre del Proyecto: Paracaídas Comandado Autónomo para Entrega de Cargas  
Nombre Abreviado: Proyecto PCA  
Proyecto: PIDDEF 038/14

Informe Técnico: Sistema de Atenuación de Impacto en Aterrizaje  
Revisión: /  
Entregable: VI

Autor: Andrés Liberatto  
Departamento Mecánica Aeronáutica  
Facultad de Ingeniería - IUA  
aliberatto@iua.edu.ar

Revisó: Juan Jromei  
Departamento Mecánica Aeronáutica  
Facultad de Ingeniería - IUA  
jjromei@iua.edu.ar

## Resumen

En este trabajo, correspondiente a la Etapa #2 del proyecto PIDDEF 038/14 'Paracaídas Comandado Autónomo para Entrega de Cargas', se estudia cuales son las características deseables para el 'packaging' de la carga lanzada, de modo que ésta, al impactar sobre el suelo y detenerse, sufra aceleraciones dentro de valores considerados permisibles. El informe contiene información general sobre los aspectos tecnológicos de la atenuación de impacto en el aterrizaje, ofrece resultados de análisis numéricos realizados sobre modelos de espumas poliméricas y modelos de estructuras de láminas del tipo colapsables y también presenta resultados de ensayos de impacto realizados sobre especímenes de estos mismos materiales/estructuras.

Los resultados señalan que las estructuras de paredes delgadas en celdas cerradas, del tipo honeycomb superan ampliamente y en varios aspectos técnicos a las espumas poliméricas. Entre ellos se pueden destacar: la eficiencia en la disipación de energía de impacto y la posibilidad de control de los niveles de factores de desaceleración, entre otros. En oposición a las ventajas técnicas, la principal desventaja del honeycomb frente al foam, es que no se encuentra disponible en el mercado local y, hasta el momento, no se han encontrado materiales/estructuras similares que puedan ser utilizadas como sustitutos.

Adicionalmente, y a partir del estudio realizado, se ha desarrollado una herramienta de pre-diseño para los atenuadores de impacto, en función del tipo de carga a ser lanzada, de su tamaño y de la velocidad vertical en el momento del choque.

## Índice

<b>I</b>	<b>Consideraciones Iniciales</b>	<b>7</b>
1.	Introducción	7
2.	Objetivos	7
2.1.	Objetivo General . . . . .	7
2.2.	Objetivos Específicos . . . . .	7
3.	Dispositivos de Atenuación de Impacto en el Aterrizaje	8
3.1.	Aspectos Energéticos del Proceso de Aterrizaje . . . . .	8
3.2.	Requerimientos de Diseño y Selección . . . . .	10
4.	Atenuadores de Impacto Colapsables	10
4.1.	Generalidades . . . . .	10
4.2.	Espumas (o Foams) . . . . .	11
4.2.1.	Modelos Constitutivos . . . . .	11
4.2.2.	Comportamiento Histerético . . . . .	12
4.2.3.	Respuesta Dinámica . . . . .	12
4.3.	Estructuras de Celdas de Paredes Delgadas del Tipo Honeycomb . . . . .	12
4.3.1.	Carga Crítica de Pandeo . . . . .	13
<b>II</b>	<b>Comparación de la Respuesta a Impacto de Materiales Colapsables Mediante Simulación Numérica</b>	<b>14</b>
5.	Preliminares	14
5.1.	Consideraciones Generales . . . . .	14
5.1.1.	Masa de la Carga de Prueba y Velocidad de Impacto . . . . .	14
5.1.2.	Desaceleración y Distancia de Frenado . . . . .	14
5.1.3.	Dimensiones de las Probetas de Material Colapsable . . . . .	14
5.1.4.	Rigidez del Suelo al Momento del Impacto . . . . .	15
5.2.	Tipos de Análisis . . . . .	15
6.	Modelo Mecánico	15
6.1.	Sistema de Referencia . . . . .	15
6.2.	Geometría . . . . .	15
6.3.	Modelos de los Materiales y sus Parámetros . . . . .	16
6.3.1.	Propiedades Físicas y Mecánicas del Acero Estructural - Material de la Carga de Prueba	16
6.3.2.	Propiedades Físicas y Mecánicas de las Espumas . . . . .	16
6.3.3.	Propiedades Físicas y Mecánicas del Papel . . . . .	18
6.4.	Vínculos entre Partes (Contactos) . . . . .	19
6.5.	Discretización del Dominio de Cálculo (Malla) . . . . .	19
6.6.	Condiciones Iniciales y de Contorno . . . . .	19
6.7.	Configuración del Análisis . . . . .	20
6.8.	Post-Proceso . . . . .	20
6.9.	Resumen de Casos de Análisis . . . . .	20
7.	Resultados	21
7.1.	Espumas Poliméricas . . . . .	21
7.2.	Estructuras de Celdas Colapsables Exagonales del Tipo Honeycomb . . . . .	25
<b>III</b>	<b>Ensayos de Laboratorio Realizados sobre Materiales Colapsables Disponibles en el Mercado Local</b>	<b>30</b>

<b>8. Respuesta a Impacto de Espumas Poliméricas de Baja Densidad</b>	<b>30</b>
<b>9. Respuesta a Impacto del Honeycomb de Papel</b>	<b>32</b>
<b>10. Comparación de las Respuestas a Impacto de las Diferentes Alternativas Evaluadas</b>	<b>33</b>
<b>IV Calculadora para Pre-dimensionamiento de Atenuadores de Impacto Colapsables</b>	<b>35</b>
<b>11. Descripción General</b>	<b>35</b>
<b>12. Tratamiento de las Espumas Poliméricas</b>	<b>35</b>
<b>13. Tratamiento de las Estructuras de Celdas Colapsables</b>	<b>36</b>
<b>V Comentarios Finales</b>	<b>37</b>
<b>14. Observaciones Técnicas Generales</b>	<b>37</b>
<b>15. Comentarios sobre los Resultados de Simulación</b>	<b>37</b>
15.1. Atenuadores Construidos a partir de Espumas Poliméricas . . . . .	37
15.2. Atenuadores de Celdas Colapsables, Construidos a partir de Láminas de Papel . . . . .	38
<b>16. Comentarios sobre los Resultados de Ensayo</b>	<b>38</b>
16.1. Atenuadores Construidos a partir de Espumas Poliméricas . . . . .	38
16.2. Atenuadores de Celdas Colapsables, Construidos a partir de Láminas de Papel . . . . .	38
<b>17. Comentarios sobre la Calculadora para el Pre-dimensionamiento de los Atenuadores de Impacto</b>	<b>39</b>

## Índice de figuras

1.	Selección de la tecnología del atenuador de impacto, en función de la distancia de desaceleración $s$ , para velocidades de descenso entre 0 y 10 m/s y factores de desaceleración permisibles entre 5 y 50 g. . . . .	10
2.	Curvas de Factor de Desaceleración Máximo en función de la Tensión Estática, obtenidas para las espumas poliméricas estudiadas. ( $V_{\text{impacto}} = 5 \text{ m/s}$ ) . . . . .	25
3.	Curvas de Factor de Desaceleración Máximo en función de la Tensión Estática, obtenidas para las estructuras de celdas colapsables estudiadas. ( $V_{\text{impacto}} = 5 \text{ m/s}$ ) . . . . .	28
4.	Curvas de Factor de Desaceleración Máximo en función de la Tensión Estática, obtenidas para diferentes materiales y estructuras colapsables estudiadas, candidatas a ser utilizados como atenuadores de impacto. ( $V_{\text{impacto}} = 5 \text{ m/s}$ ) . . . . .	29
5.	Historia del Factor de Desaceleración en el Impacto en función del tiempo para un espécimen de foam de $10 \text{ Kg/m}^3$ y 100 mm de espesor, cuando es sometido al impacto de una masa de 3.7 Kg con una velocidad de 5.6 m/s. . . . .	31
6.	Historia del Factor de Desaceleración en el Impacto en función del tiempo para un espécimen de foam de $10 \text{ Kg/m}^3$ y 200 mm de espesor, cuando es sometido al impacto de una masa de 3.7 Kg con una velocidad de 5.4 m/s. . . . .	31
7.	Historia del Factor de Desaceleración en el Impacto en función del tiempo para un espécimen de honeycomb de cartón, con celdas hexagonales de dimensiones $b = 6 \text{ mm}$ , $h = 8 \text{ mm}$ y $\alpha = 45^\circ$ , y con un espesor del atenuador de 100 mm, cuando es sometido al impacto de una masa de 3.7 Kg con una velocidad de 5.6 m/s. . . . .	32
8.	Historia del Factor de Desaceleración en el Impacto en función del tiempo para un espécimen de honeycomb de papel tipo Rag Bond $75 \text{ g/m}^2$ , con celdas hexagonales de dimensiones $b = 6 \text{ mm}$ , $h = 13 \text{ mm}$ y $\alpha = 48^\circ$ , y con un espesor del atenuador de 200 mm, cuando es sometido al impacto de una masa de 3.7 Kg con una velocidad de 5.5 m/s. . . . .	33
9.	Comparación de las historias del Factor de Desaceleración en el Impacto en función del tiempo para los diferentes especímenes ensayados, cuando son sometidos al impacto de una masa de 3.7 Kg con una velocidad aproximada de 5.5 m/s. . . . .	34

## Índice de cuadros

1.	Factores de Desaceleración de Impacto Admisibles. (Ref.: [7]) . . . . .	9
2.	Tipo de Atenuador de Impacto en función de la Distancia de Desaceleración. . . . .	9
3.	Propiedades físicas y mecánicas de ACERO. . . . .	16
4.	Propiedades físicas y mecánicas de POLYSTYRENE FOAM BASF 2500. . . . .	17
5.	Curva de Compactación - Relación Tensión Principal Máxima vs. Deformación Volumétrica. [POLYSTYRENE FOAM BASF 2500] . . . . .	17
6.	Propiedades físicas y mecánicas de RMAX ISOLITE EXPANDED POLYSTYRENE 20 $\frac{Kg}{m^3}$ . . . . .	17
7.	Curva de Compactación - Relación Tensión Principal Máxima vs. Deformación Volumétrica. [RMAX ISOLITE EXPANDED POLYSTYRENE 20 $\frac{Kg}{m^3}$ ] . . . . .	17
8.	Propiedades físicas y mecánicas de RMAX ISOLITE EXPANDED POLYSTYRENE 13 $\frac{Kg}{m^3}$ . . . . .	18
9.	Curva de Compactación - Relación Tensión Principal Máxima vs. Deformación Volumétrica. [RMAX ISOLITE EXPANDED POLYSTYRENE 13 $\frac{Kg}{m^3}$ ] . . . . .	18
10.	Propiedades mecánicas del papel. (Ref.: [3]) . . . . .	18
11.	Propiedades físicas y mecánicas de PAPER RAG BOND 75 $\frac{g}{m^2}$ . ( $t \approx 0.09$ mm) . . . . .	18
12.	Propiedades físicas y mecánicas de PAPER OFFSET 107 $\frac{g}{m^2}$ . ( $t \approx 0.13$ mm) . . . . .	19
13.	Tabla resumen de casos de análisis. La combinación de tipos de análisis (dinámico y estático), de diferentes materiales, arquitecturas y espesores de loa atenuadores, devuelven un total de 27 casos de estudio a ser considerados. . . . .	20
14.	Características de Interés de las Espumas como Material Disipador. . . . .	21
15.	Resumen de Resultados [CASO 1: Polystyrene Foam BASF 2500]. . . . .	21
16.	Factor de Desaceleración Máximo en función de la Tensión Estática: $V_{impacto} = 5$ m/s & $t_{atenuador} = 100$ mm [CASO 1: Polystyrene Foam BASF 2500]. . . . .	21
17.	Factor de Desaceleración Máximo en función de la Tensión Estática: $V_{impacto} = 5$ m/s & $t_{atenuador} = 250$ mm [CASO 1: Polystyrene Foam BASF 2500]. . . . .	22
18.	Factor de Desaceleración Máximo en función de la Tensión Estática: $V_{impacto} = 5$ m/s & $t_{atenuador} = 450$ mm [CASO 1: Polystyrene Foam BASF 2500]. . . . .	22
19.	Resumen de Resultados [CASO 2: RMAX Isolite Expanded Polystyrene 20 $\frac{Kg}{m^3}$ ]. . . . .	22
20.	Factor de Desaceleración Máximo en función de la Tensión Estática: $V_{impacto} = 5$ m/s & $t_{atenuador} = 100$ mm [CASO 2: RMAX Isolite Expanded Polystyrene 20 $\frac{Kg}{m^3}$ ]. . . . .	23
21.	Factor de Desaceleración Máximo en función de la Tensión Estática: $V_{impacto} = 5$ m/s & $t_{atenuador} = 250$ mm [CASO 2: RMAX Isolite Expanded Polystyrene 20 $\frac{Kg}{m^3}$ ]. . . . .	23
22.	Factor de Desaceleración Máximo en función de la Tensión Estática: $V_{impacto} = 5$ m/s & $t_{atenuador} = 450$ mm [CASO 2: RMAX Isolite Expanded Polystyrene 20 $\frac{Kg}{m^3}$ ]. . . . .	23
23.	Resumen de Resultados [CASO 3: RMAX Isolite Expanded Polystyrene 13 $\frac{Kg}{m^3}$ ]. . . . .	24
24.	Factor de Desaceleración Máximo en función de la Tensión Estática: $V_{impacto} = 5$ m/s & $t_{atenuador} = 100$ mm [CASO 3: RMAX Isolite Expanded Polystyrene 13 $\frac{Kg}{m^3}$ ]. . . . .	24
25.	Factor de Desaceleración Máximo en función de la Tensión Estática: $V_{impacto} = 5$ m/s & $t_{atenuador} = 250$ mm [CASO 3: RMAX Isolite Expanded Polystyrene 13 $\frac{Kg}{m^3}$ ]. . . . .	24
26.	Factor de Desaceleración Máximo en función de la Tensión Estática: $V_{impacto} = 5$ m/s & $t_{atenuador} = 450$ mm [CASO 2: RMAX Isolite Expanded Polystyrene 13 $\frac{Kg}{m^3}$ ]. . . . .	25
27.	Resumen de Resultados [CASO 4: Papel RAG BOND 75 $\frac{g}{m^2}$ ( $t \approx 0.09$ mm) - Celdas: 17 mm, 6 mm & 12 mm]. . . . .	26
28.	Factor de Desaceleración Máximo en función de la Tensión Estática: $V_{impacto} = 5$ m/s & $t_{atenuador} = 100$ mm [CASO 4: Papel RAG BOND 75 $\frac{g}{m^2}$ ( $t \approx 0.09$ mm) - Celdas: 17 mm, 6 mm & 12 mm]. . . . .	26
29.	Factor de Desaceleración Máximo en función de la Tensión Estática: $V_{impacto} = 5$ m/s & $t_{atenuador} = 250$ mm [CASO 4: Papel RAG BOND 75 $\frac{g}{m^2}$ ( $t \approx 0.09$ mm) - Celdas: 17 mm, 6 mm & 12 mm]. . . . .	26
30.	Resumen de Resultados [CASO 5: Papel OFFSET 107 $\frac{g}{m^2}$ ( $t \approx 0.13$ mm) - Celdas: 17 mm, 6 mm & 12 mm]. . . . .	27
31.	Factor de Desaceleración Máximo en función de la Tensión Estática: $V_{impacto} = 5$ m/s & $t_{atenuador} = 100$ mm [CASO 5: Papel OFFSET 107 $\frac{g}{m^2}$ ( $t \approx 0.13$ mm) - Celdas: 17 mm, 6 mm & 12 mm]. . . . .	27

32.	Factor de Desaceleración Máximo en función de la Tensión Estática: $V_{\text{impacto}} = 5 \text{ m/s}$ & $t_{\text{atenuador}} = 250 \text{ mm}$ [CASO 5: Papel OFFSET 107 $\frac{g}{m^2}$ ( $t \approx 0.13 \text{ mm}$ ) - Celdas: 17 mm, 6 mm & 12 mm]. . . . .	27
33.	Factor de Desaceleración Máximo en función de la Tensión Estática: $V_{\text{impacto}} = 5 \text{ m/s}$ & $t_{\text{atenuador}} = 100 \text{ mm}$ [CASO 5 (EXTRA): Papel OFFSET 107 $\frac{g}{m^2}$ ( $t \approx 0.13 \text{ mm}$ ) - Celdas: 20 mm, 9 mm & 15 mm]. . . . .	28
34.	Resumen de Resultados: Espuma Polimérica 10 Kg/m <sup>3</sup> . . . . .	32
35.	Resumen de Resultados: Honeycomb hexagonal de papel. . . . .	33
36.	Coefficientes para la ecuación constitutiva de las Espumas de Poliestireno como función de la densidad. (Ref.: [4]) . . . . .	35

## Parte I

# Consideraciones Iniciales

## 1. Introducción

El propósito general del proyecto PIDDEF 038/14 es desarrollar un sistema aéreo guiado y de precisión, mediante el empleo de un paracaídas comandado autónomo, para la entrega de cargas en ejercicios militares, situaciones de aislamiento producidas por inundaciones, lucha contra el fuego y ayuda humanitaria, entre otros. La propuesta es diseñar, construir y evaluar un demostrador de tecnología (prototipo de paracaídas comandado autónomo de pequeñas dimensiones), estudiar y definir un sistema de apertura confiable y flexible y proyectar un sistema aéreo similar, a mayor escala, capaz de entregar una carga útil de 100 kg.

El desarrollo de las actividades prevé dos etapas:

- **Etapla #1 - Demostrador de tecnología:** Consiste en el diseño y construcción un prototipo de paracaídas comandado a escala reducida para su modelado matemático, estudio e implementación de las leyes de control y estrategias de guiado. Inicialmente el prototipo sería moto-propulsado para facilitar la realización de los ensayos en vuelo (ascensos y descensos reiterados), y luego de la definición e implementación del sistema de extracción y apertura, se realizarían lanzamientos desde una aeronave.
- **Etapla #2 - Proyección del dispositivo para la entrega de 100 kg de carga útil:** Consiste en, a partir de los resultados generados en la primera etapa, desarrollar un sistema de entrega de 100 kg de carga útil, lo que implica, además de realizar análisis relacionados con el área de control y guiado, llevar adelante estudios de ingeniería tales como la evaluación de performances, estimación de cargas, verificaciones estructurales, selección de equipos (con su evaluación de disponibilidad) y estudios de impacto en el aterrizaje, entre otros.

Este informe técnico corresponde a la Etapa #2 del proyecto y presenta un estudio realizado sobre los dispositivos de atenuación de impacto en el aterrizaje, de modo que las aceleraciones producidas sobre la carga, en esta etapa final del vuelo, satisfagan los factores de desaceleración de impacto permisibles, de acuerdo con el tipo de carga transportada y las condiciones previstas para el choque.

## 2. Objetivos

### 2.1. Objetivo General

Estudiar materiales y/o estructuras de tipo colapsable a fin de equipar las cargas aerotransportadas, mediante el empleo de paracaídas, con atenuadores de impacto que satisfagan los requerimientos de aceleración y absorción de energía durante el aterrizaje, y que además, se encuentren disponibles en el mercado local.

### 2.2. Objetivos Específicos

- Definir un conjunto de requerimientos operacionales, de diseño y selección del dispositivo disipador de energía.
- Construir y configurar un Modelo de Elementos Finitos que permita realizar estudios comparativos entre diferentes configuraciones de atenuadores de impacto colapsables.
- Obtener las historias de aceleración para cada atenuador de impacto.
- Comparar y señalar aquellos que satisfagan los requerimientos de selección y/o que resulten más adecuados.
- Generar curvas tensión-deformación (estáticas) para cada absorbedor de energía, procurando establecer algún tipo de relación con los resultados de carga-desplazamiento generado en los análisis dinámico.
- Diseñar y construir un montaje experimental que permita medir y evaluar la respuesta a impacto de diferentes tipos de atenuadores.

- Obtener resultados experimentales que permitan decidir sobre la posibilidad de utilizar algún material colapsable disponible en el mercado local.
- Trazar curvas de diseño y/o crear alguna aplicación que permita realizar el pre-diseño de los atenuadores de impacto, en función del tipo de carga, de su tamaño y de la velocidad vertical en el momento del choque.

### 3. Dispositivos de Atenuación de Impacto en el Aterrizaje

#### 3.1. Aspectos Energéticos del Proceso de Aterrizaje

El aterrizaje es el proceso final del vuelo en el que el dispositivo entra en contacto con el suelo para su detención y reposo. Esto implica que la energía de movimiento del aparato debe ser absorbida y/o disipada de alguna manera.

La energía cinética total se divide según una energía asociada a la velocidad de vuelo horizontal y a la velocidad de vuelo vertical.

$$E = E_h + E_v$$

$$E = \frac{1}{2}mV_h^2 \left( \frac{1}{2}mV_v^2 + mgs \right)$$

$$E = mg \left[ \frac{1}{2g} (V_h^2 + V_v^2) + s \right]$$

Nota #1: Notar que se ha asumido un cambio de energía cinética tal que el valor final de la misma es nulo, es decir  $V_{v,final} = V_{h,final} = 0$  m/s.

Nota #2: Notar que a la energía vertical se ha adicionado el trabajo realizado por el peso de la carga a lo largo de la distancia de desaceleración  $s$ .

En descensos a muy baja velocidad, la energía cinética vertical puede ser absorbida por la deformación elástica de la propia carga y/o disipada por la penetración de la carga en el suelo (dependiendo del tipo de suelo). La energía cinética horizontal puede ser disipada por fricción/deslizamiento (una vez que la carga se ha apoyado sobre el suelo).

La energía a ser absorbida durante el aterrizaje es el trabajo hecho por la fuerza del aterrizaje a lo largo de la distancia de desaceleración (o aceleración de frenado), que se mide en términos de factores de carga, a los que se denomina, factores de desaceleración,  $n$ .

Para la mayoría de las cargas, los factores de desaceleración máximos permisibles se encuentran limitados por consideraciones estructurales y tipos de cargas.

Considerando solamente la disipación de energía en dirección vertical, se plantea que la totalidad de la energía cinética debe ser absorbida por el atenuador de impacto<sup>1</sup>:

$$W_{F_{land}} = E_v$$

El trabajo realizado por en atenuador puede estimarse como el producto entre la fuerza media de aterrizaje  $F_{land}$ , la distancia de desaceleración  $s$  y un factor de eficiencia de atenuación de impacto  $\eta$ .

Adicionalmente, la fuerza media de aterrizaje se computa como el peso multiplicado por un factor de desaceleración admisible:  $F_{land} = nmg$ .

$$W_{F_{land}} = F_{land}s\eta = nmgs\eta$$

La energía cinética vertical de la carga, a ser absorbida, está dada por  $\frac{1}{2}mV_v^2$ . A esto se puede adicionar el trabajo que realiza el peso de la misma a lo largo de la distancia de desaceleración  $s$ :

$$E_v = \frac{1}{2}mV_v^2 + mgs = mg \left[ \frac{1}{2g}mV_v^2 + s \right]$$

<sup>1</sup>Más el trabajo realizado por el peso de la propia carga a lo largo del desplazamiento de desaceleración.

Luego, el trabajo realizado por la fuerza media de aterrizaje debe ser igual a la variación de energía cinética, más el trabajo realizado por el peso de la carga.

$$nmgs\eta = mg \left[ \frac{1}{2g} V_v^2 + s \right]$$

$$s(n\eta - 1) = \frac{1}{2g} m V_v^2$$

$$s = \frac{V_v^2}{2g(n\eta - 1)}$$

Luego, la distancia de desaceleración  $s$ , depende de la velocidad de descenso  $V_v$  y del factor de desaceleración permisible  $n$ . Valores de referencia para factores de desaceleración permisible, se listan en la siguiente tabla<sup>2</sup>:

Tipo de Carga/Operación	$n$ [g]
Carga Militar	20 a 35
Estructuras no Tripuladas	20 a 30
Equipos de Telemetría	20 a 25
Equipos Electrónicos (Delicados)	5 a 10

Cuadro 1: Factores de Desaceleración de Impacto Admisibles. (Ref.: [7])

La relación  $s = \frac{V_v^2}{2g(n\eta-1)}$  solamente contabiliza el balance energético vertical. El movimiento horizontal de la carga, requiere:

- Desconectar mecánicamente el paracaídas una vez que haya entrado en contacto con el suelo, a fin de evitar que la carga sea arrastrada.
- Utilizar un atenuador de impacto de tipo 'omnidireccional', ya que se ha probado que no resulta posible controlar o predecir la orientación de la carga en el momento del aterrizaje. Consecuentemente, este requerimiento excluye a ciertos tipos de disipadores.

Adicionalmente, la tecnología del atenuador de impacto se encuentra fuertemente vinculada a la distancia de desaceleración  $s$ .

$s$ [m]	Tipo de Atenuador
0.3	Colapsable (Foam, Honeycomb)
0.3 a 0.9	Bolsa de Aire (Airbag)
> 0.9	Retro-Propulsor (Rocket)

Cuadro 2: Tipo de Atenuador de Impacto en función de la Distancia de Desaceleración.

Asumiendo una eficiencia del atenuador de impacto de  $\eta \approx 0.65$ , se trazan curvas de distancia de desaceleración  $s$  en función de la velocidad de descenso  $V_v$ , para los factores de desaceleración admisibles,  $n = 5, 10, 20$  y  $50$  g. Se emplea la ecuación:  $s = \frac{V_v^2}{2g(n\eta-1)}$ .

Para desaceleraciones entre 10 g y 35 g, y velocidades de descenso en el orden de 5 m/s, la solución tecnológica adecuada (con base en la distancia de desaceleración), señala que deben utilizarse materiales y/o estructuras de tipo colapsables.

<sup>2</sup>Ver también las categorías listadas en la Tabla V del documento Ref.: [5].

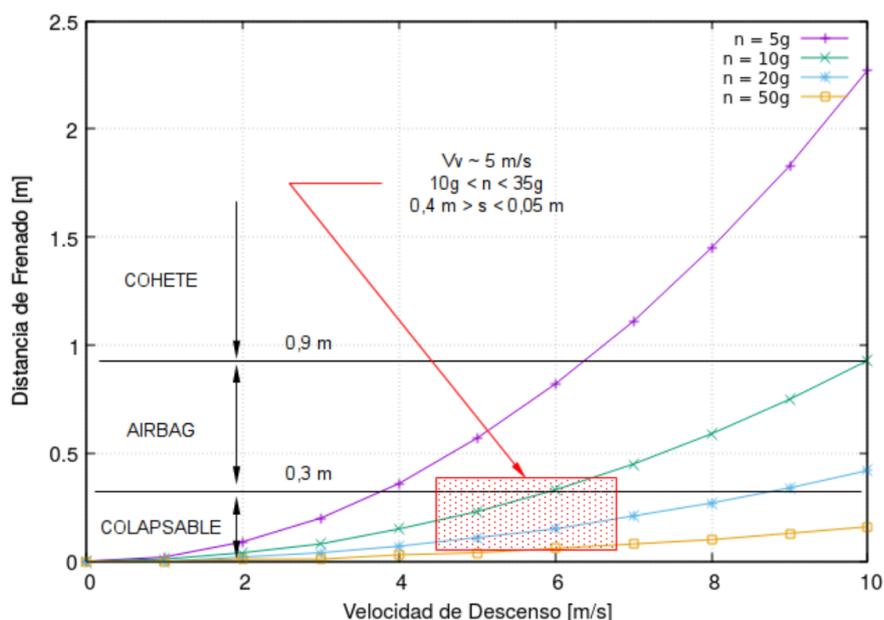


Figura 1: Selección de la tecnología del atenuador de impacto, en función de la distancia de desaceleración  $s$ , para velocidades de descenso entre 0 y 10 m/s y factores de desaceleración permisibles entre 5 y 50 g.

### 3.2. Requerimientos de Diseño y Selección

Además de la distancia de desaceleración, la selección del tipo de atenuador de impacto, depende de un conjunto de consideraciones adicionales:

- Distancia de desaceleración (ya mencionada).
- Características de absorción de energía del disipador: Capacidad de absorber y/o disipar energía. (Toda la energía devuelta por el atenuador de impacto puede hacer rebotar la carga.)
- Toda la energía debe ser absorbida dentro del 70 % de deformación del atenuador.
- Se deben absorber las energías del movimiento en dirección vertical y horizontal (atenuador omnidireccional). Este requerimiento descarta el empleo de absorbedores de impacto del tipo oleo-pneumáticos.)
- Peso, volumen y condiciones de almacenamiento del atenuador. (Pequeños volúmenes de almacenaje.)
- Condiciones del suelo en el punto de aterrizaje.
- Disponibilidad y costo. (MUY importante para el lanzamiento de cargas. Tan es así que, dentro de ciertos límites, se prioriza costo frente a confiabilidad del sistema, para este tipo de operaciones.)
- Grado de reutilización y reciclado. (NO requerido para el lanzamiento de cargas.)
- Transparencia a las señales de radio.

## 4. Atenuadores de Impacto Colapsables

### 4.1. Generalidades

Los atenuadores de impacto del tipo colapsables basan su funcionamiento en el empleo de materiales y/o estructuras que fallan ante la sollicitación de la carga de impacto. La falla mecánica disipa energía además de evitar que los niveles de carga se incrementen indefinidamente, permitiendo controlar los niveles de desaceleración en el impacto.

De acuerdo con lo señalado en el documento de la Ref.: [7], la principal aplicación de atenuadores colapsables se da en la entrega aérea de cargas, utilizando plataformas. Este tipo de operación requiere absorber energía

de impacto, mayormente en dirección vertical. La disipación de energía en dirección horizontal se deja a las fuerzas de fricción producidas en el deslizamiento de la carga sobre el suelo.

Dentro de la familia de atenuadores colapsables se identifican dos opciones básicas:

- Estructuras de paredes delgadas formando celdas cerradas del tipo honeycomb, construidas a partir de láminas de celulosa o de aluminio.
- Estructuras porosas de celdas cerradas o abiertas, plásticas o metálicas (Espumas (o Foams)).

Las espumas, ya sean plásticas o metálicas, presentan un comportamiento casi 100 % isotrópico. Las estructuras del tipo honeycomb, por su parte, ofrecen una respuesta anisotrópica, mostrando su mayor capacidad de absorber energía en la dirección longitudinal de las celdas, mientras que en las otras dos direcciones, esta capacidad se reduce a aproximadamente un 25 % de la primera.

La respuesta general de un atenuador colapsable (tensión-deformación) muestra: (i) un rango inicial lineal, (ii) grandes deformaciones hasta un 70 % de deformación volumétrica, con endurecimiento o sin el, (iii) un rango de endurecimiento muy pronunciado, producido por la 'densificación' del material (esto ocurre a niveles de deformaciones volumétricas entre 70 % y 80 %) y (iv) la devolución de un remanente de energía de deformación elástica.

Esta última fase de la respuesta mecánica del atenuador conduce a elevados niveles de carga, si la energía total del impacto no fuera absorbida antes de una deformación volumétrica de 70 %.

## 4.2. Espumas (o Foams)

Las espumas utilizadas para absorber energía de impacto pueden ser del tipo metálicas (aluminio) o poliméricas. En este último caso, expandidos de polímeros tales como poliuretano o polipropileno.

Durante el proceso de moldeo, los polímeros forman celdas de paredes delgadas, cerradas o abiertas que contienen aire en su interior. La cantidad de material sólido de una espuma corresponde a una fracción muy pequeña de volumen total y, consecuentemente, la densidad volumétrica del expandido resulta muy baja.

Aunque la resistencia en tracción de las espumas es relativamente baja, estas pueden mantener elevados niveles de deformación en compresión, sin perder capacidad de carga. Esta característica, sumada a la baja densidad del material expandido, hacen de las espumas materiales/estructuras con buena capacidad de absorción de energía por unidad de masa.

### 4.2.1. Modelos Constitutivos

Con fines de cálculo y análisis, desde un enfoque macroscópico, es posible construir modelos constitutivos aproximados para las espumas, considerando que se trata de un material pseudo-isotrópico, continuo, con una relación constitutiva altamente no lineal, muy diferente de las relaciones constitutivas de los metales y los polímeros. Las espumas se encuentran llenas de burbujas de aire, por lo que su comportamiento muestra un pequeño primer rango lineal y luego de la fluencia se producen muy grandes deformaciones en compresión, con algo de endurecimiento. A partir de ahí, el material se torna más denso, su rigidez crece en forma abrupta y también se vuelve mucho más resistente. Este proceso se denomina densificación y es un comportamiento característico de las espumas. En contraste con los metales, el módulo de elasticidad tangencial de las espumas se incrementa en lugar de reducirse.

Otro comportamiento interesante de las espumas, desde el punto de vista constitutivo, es que muestran un coeficiente de Poisson efectivo aproximadamente nulo, no presentando deformaciones laterales aún cuando las deformaciones compresivas resultan elevadas. (Ref.: [9])

Adicionalmente, la teoría de plasticidad regular no resulta adecuada para describir la gran compresibilidad y endurecimiento de las espumas, ya que asume incompresibilidad en campo plástico, con una superficie de fluencia convexa. Dado que las espumas presentan una estructura porosa, no necesariamente sigue las reglas desarrolladas para materiales continuos. La presencia de burbujas de aire hace que las ecuaciones constitutivas sean complejas y aún un desafío.

La bibliografía consultada describe modelos simples tales como:

- *Cap Model*: Combinación de plasticidad volumétrica y plasticidad desviadora dependiente de la presión. (Ref.: [9])
- *Estructura Polimérica y Aire* (Ref.: [9])
- *Modelo Uniaxial Fenomenológico* (Ref.: [9])
- *Porosity - Crushable Foam Model* (Ref.: [1])

Los dos primeros modelos requieren muy buenos ensayos de laboratorio, condición que los vuelve poco prácticos para este trabajo.

En ciertas ocasiones, las espumas son cargadas casi exclusivamente en una única dirección, es decir, principalmente en forma uniaxial, con lo cual el comportamiento hidrostático no resulta críticamente importante, permitiendo obtener una buena aproximación desde el empleo de modelos uniaxiales simples, que no toman en cuenta el efecto de la presión. Este es el caso del Modelo Uniaxial Fenomenológico (Ref.: [9]) y del Porosity - Crushable Foam Model (Ref.: [1]). En estos modelos, la función de fluencia es asignada a las direcciones principales, y el modelo constitutivo se puede expresar como:

$$\begin{aligned}\sigma_j &= E\varepsilon_j, \text{ para } \sigma_j < F_{cy} \\ \sigma_j &= f(\varepsilon_j), \text{ para } \sigma_j \geq F_{cy} \\ j &= 1, 2, 3\end{aligned}$$

Donde  $F_{cy}$  es la tensión de fluencia inicial y,  $f(\varepsilon_j)$ , puede basarse en datos de ensayos tabulados.

#### 4.2.2. Comportamiento Histerético

En adición a la descripción de arriba, las espumas resultan ser materiales/estructuras altamente histeréticos. Algunos de ellos son capaces de recuperar su forma original rápidamente, luego de ser descargados, mientras que a otros les puede tomar mucho más tiempo. En general, la fase de descarga no muestra una respuesta del tipo elástica lineal.

Dado que el proceso carga-descarga es mayormente irreversible, las espumas pueden perder entre el 50 % y el 80 % de su capacidad de absorción de energía cuando son vueltas a cargar, luego de una primera descarga. Para el tipo de uso que se les daría a estos materiales en el marco del proyecto, el comportamiento histerético que muestran los convierte en *no-reutilizables*.

#### 4.2.3. Respuesta Dinámica

Las espumas exhiben una fuerte sensibilidad a la velocidad de deformación (strain rate -  $\dot{\varepsilon}$ ).

Bajo la acción de una carga dinámica, las espumas ofrecen mayor resistencia y absorben mayor cantidad de energía que bajo la acción de la misma carga, en condiciones estáticas.

Para tomar en cuenta estos efectos, la relación constitutiva puede ser modificada extendiéndola de manera similar a como se hace con los modelos de plasticidad de los metales, en particular, por simplicidad y disponibilidad de datos, se propone trabajar con el modelo strain rate de Cowper-Symonds:

$$\sigma_y^d = \sigma_y^s \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \right]$$

Con  $\dot{\varepsilon}_0$  y  $\gamma$  parámetros de strain rate del modelo de Cowper-Symonds.

### 4.3. Estructuras de Celdas de Paredes Delgadas del Tipo Honeycomb

A diferencia de las espumas, las estructuras del tipo honeycomb presentan una respuesta anisotrópica (básicamente ortotrópica), siendo mucho más fuerte en la dirección longitudinal de las celdas, que lateralmente. Las celdas forman una estructura de paredes delgadas. El espesor de las láminas es muy pequeño si se lo compara con el tamaño de las celdas (1 % a 10 %). El espesor de pared es el doble del espesor de la lámina en aquellas paredes donde el arreglo de láminas se pega para dar lugar a la estructura.

El colapso de este tipo de arquitectura tiene que ver con el pandeo local de las paredes de las celdas y la falla local (cripling/crushing) de las múltiples esquinas donde tales paredes se conectan entre sí. Los ensayos de

resistencia en compresión uniaxial, realizados en la dirección de las celdas, muestran que la carga compresiva oscila alrededor de un valor medio constante, una vez que las paredes de las celdas se han inestabilizado por primera vez (Ref.: [9]). Esto significa que, alcanzada la carga de pandeo local inicial, la tensión/carga de colapso se mantiene aproximadamente constante mientras la estructura se comprime. Esta planitud de la curva tensión-deformación, ofrece una manera sencilla de dimensionar el material para ser utilizado en la absorción de energía durante un impacto.

La planitud de la curva tensión-deformación es una característica de este tipo de estructuras, y se mantiene hasta valores de deformación muy elevados. Si bien las celdas se encuentran vacías y el material no presenta un fenómeno de densificación, tal como el descrito para las espumas, cuando las deformaciones se vuelven muy grandes (> 80%) las láminas de las paredes se apilan y el honeycomb se comporta como un bloque sólido.

Lateralmente, estas estructuras presentan una relación constitutiva similar a la obtenida para la dirección longitudinal de las celdas, pero con una resistencia muy inferior.

#### 4.3.1. Carga Crítica de Pandeo

La resistencia en compresión de un panel de honeycomb en la dirección longitudinal de las celdas, varía esencialmente con su densidad ( $\bar{\rho}$ ). Otros factores que afectan su resistencia son:

- *El espesor del panel de honeycomb:* La resistencia en compresión se reduce en la medida que el espesor del panel se incrementa.
- *Las restricciones de las uniones entre láminas (pegadas para dar forma a la estructura de celdas)*
- *La temperatura:* Que reduce la resistencia en compresión en la medida que esta aumenta. (Láminas metálicas.)
- *El tamaño de las celdas*
- *La aleación/adhesivo utilizado para la unión de las láminas*

Una estimación de la resistencia en compresión de un panel de honeycomb en la dirección longitudinal de las celdas se puede realizar con base en la estimación de la tensión de falla local de las paredes de las mismas, asumiendo que se trata de una sección con múltiples esquinas (**Método de Gerard** (Ref.: [2])):

$$\sigma_3^* \approx \begin{cases} 0,56F_{cy} \left(\frac{\bar{\rho}}{\rho}\right) \left(\frac{g\bar{t}^2}{A} \sqrt{\frac{E_c}{F_{cy}}}\right)^{0,85}, & \text{si } 0,56 \left(\frac{g\bar{t}^2}{A} \sqrt{\frac{E_c}{F_{cy}}}\right)^{0,85} \leq 0,80 \\ 0,80F_{cy} \left(\frac{\bar{\rho}}{\rho}\right), & \text{si } 0,56 \left(\frac{g\bar{t}^2}{A} \sqrt{\frac{E_c}{F_{cy}}}\right)^{0,85} > 0,80 \end{cases}$$

Asumiendo que la estructura colapsable emplea una configuración de celdas exagonales, tal configuración puede ser pensada como compuesta por un patrón repetido de perfiles 'Y' conectados entre sí. Esta conexión supone que los extremos de las aletas de la 'Y' se encuentran, como mínimo, simplemente apoyados, de modo que para el empleo de las ecuaciones de Gerard, se considera<sup>3</sup>:  $g = 3$  cortes + 6 aletas = 9,  $A = 2t(b+h)$  y  $\bar{t} = t \frac{b+h}{b+\frac{h}{2}}$ .

En caso de trabajar con honeycomb de celdas cuadradas/romboidales, se puede asumir que el mismo se encuentra formado por un patrón de perfiles 'X' conectados entre sí, para los que se considera:  $g = 4$  cortes + 8 aletas = 12,  $A = 4tb$  y  $\bar{t} = t$ .

Relaciones alternativas, propuestas por diferentes autores, sugieren:

- Para honeycomb metálico (Ref.: [2]):  $\sigma_3^* \approx 3,876 \left(\frac{\bar{\rho}}{\rho}\right)^{1,464} \frac{F_{cy}}{t^{0,16}}$
- Wierzbicki (1983) (Ref.: [9]):  $\sigma_3^* \approx 6,6 \left(\frac{\bar{\rho}}{\rho}\right)^{\frac{5}{3}}$
- Gibson & Ashby (1988) y Zhang & Ashby (1992) (Ref.: [9]):  $\sigma_{3,upper}^* \approx 6E \left(\frac{\bar{\rho}}{\rho}\right)^3$  y  $\sigma_{3,lower}^* \approx 3,8E \left(\frac{\bar{\rho}}{\rho}\right)^3$

<sup>3</sup>Si fuera necesario, con el propósito de afinar las estimaciones, es posible medir las distancias h y b según la línea media, entre bordes interiores o entre bordes exteriores, siendo esta última la más conservativa.

## Parte II

# Comparación de la Respuesta a Impacto de Materiales Colapsables Mediante Simulación Numérica

## 5. Preliminares

### 5.1. Consideraciones Generales

#### 5.1.1. Masa de la Carga de Prueba y Velocidad de Impacto

Al momento del aterrizaje, la masa que impacta sobre el suelo es la de la carga paga, el packaging, el módulo de comando y algunas masas misceláneas. Si la carga útil es de 100 Kg, la masa del módulo de comando se estima, como máximo, en 20 Kg y si se prevén aproximadamente 10 Kg para el packaging y las masas misceláneas, la masa total de impacto ronda los 130 Kg.

Una carga útil de 100 Kg puede tener diferentes formas ocupar diferentes espacios, por lo que resulta difícil establecer cual podría ser el área de impacto para una carga de este tipo. Luego, para poder avanzar con las estimaciones, se define un área de contacto de  $0.36 \text{ m}^2$ , que surge de considerar una área de forma cuadrada de 600 mm de lado.

Esta masa y área de impacto, devuelven una tensión estática de 3.54 KPa, que debe ser conservada a los fines del estudio vía cálculo numérico y de la construcción del montaje experimental y de las probetas de ensayo. Si para la construcción de un modelo de elementos finitos y las probetas se considera una muestra cuadrada de material colapsable de 100 mm de lado ( $0.01 \text{ m}^2$ ), la masa que impacta sobre la misma debe ser de 3.611 Kg que, de ser construida a partir de un bloque de acero<sup>4</sup>, debe tener dimensiones 100x100x46 mm.

Adicionalmente, se prevé que el contacto con el suelo se produzca a una velocidad en el orden de 5 m/s (Ref.: [6]).

#### 5.1.2. Desaceleración y Distancia de Frenado

El valor para el factor de desaceleración  $n$ , definido como admisible varía entre 10 g y 35 g, dependiendo del tipo de carga transportada, cuando la velocidad vertical se debe reducir desde 5 m/s a 0 m/s.

Asumiendo una eficiencia del atenuador de impacto de  $\eta \approx 0.5$ , la distancia de frenado varía desde  $s = 77$  mm, para  $n = 35$  g, hasta  $s = 319$  mm, para  $n = 10$  g.

Asumiendo que la distancia de frenado total es de aproximadamente el 70 % del espesor del atenuador de impacto, los espesores del atenuador de impacto deben variar aproximadamente entre 110 mm y 456 mm.

#### 5.1.3. Dimensiones de las Probetas de Material Colapsable

Para el análisis y las pruebas se consideran boques de espumas poliméricas de diferentes densidades y paneles de honeycomb hexagonal de papel con diferentes espesores y configuración de celdas.

Tomando en cuenta que los espesores de los absorbedores de energía deben variar de 110 mm y 456 mm, se propone, a los fines del cálculo y los ensayos, trabajar con bloques de dimensiones: 100x100x100 mm, 100x100x250 mm y 100x100x450 mm.

En cuanto a las celdas exagonales de las estructuras tipo honeycomb, se consideran las siguientes dimensiones, medidas desde paneles de papel/cartón utilizados en el packaging de electrodomésticos pesados:

<sup>4</sup>Utilizar una masa de prueba de acero garantiza que la carga sea ampliamente más rígida que los atenuadores de impacto.

- Exágonos de 17 mm entre puntas, 12 mm entre caras, caras de 6 mm de longitud y  $2t$  mm espesor y diagonales de  $t$  mm de espesor. Facesheets de espesor  $t$ .
- Exágonos de 20 mm entre puntas, 15 mm entre caras, caras de 9 mm de longitud y  $2t$  mm de espesor y diagonales de  $t$  mm de espesor. Facesheets de espesor  $t$ . (Caso Extra)

#### 5.1.4. Rigidez del Suelo al Momento del Impacto

Se asume que el choque se produce sobre un suelo plano y 100 % rígido, con trayectoria en dirección normal al mismo.

## 5.2. Tipos de Análisis

La respuesta a impacto de los atenuadores colapsables, sean de espuma o de láminas formando celdas, requiere indudablemente el planteo, configuración y resolución de análisis mecánicos del tipo dinámicos, no lineales, con consideraciones especiales para los modelos de materiales, contactos, auto-contactos y grandes deformaciones, entre otros.

Dado que el análisis completo requiere como dato de entrada a la relación constitutiva de las espumas (para un strain rate dado) y que la respuesta de las estructuras tipo honeycomb muestra una tensión de colapso constante, pasado el pico de buckling inicial y previo a la compactación final de las láminas (entre el 2% y el 80% de deformación longitudinal), se propone, de manera alternativa al análisis dinámico completo, realizar análisis estáticos simplificados que permitan establecer relaciones entre las respuestas de ambos, con el propósito de descubrir si es posible definir un conjunto de reglas simples que permitan dimensionar los atenuadores de impacto para cada carga y requerimiento específico.

Para evaluar concretamente la respuesta dinámica de cada material/estructura se define un análisis dinámico estructural no lineal vía un Modelo de elementos Finitos, construido en el software ANSYS Mechanical Workbench R14.0. De manera complementaria y con objeto de validar comparativamente el modelo, se realizan ensayos de impacto sobre probetas de diferentes materiales. En cada ensayo se registra la curva de desaceleración del choque y se compara con las curvas de aceleración generadas desde la simulación numérica.

La estimación de ciertos parámetros de interés utilizando las ecuaciones simplificadas que resultan de considerar que el problema puede ser tratado según su respuesta estática, se realiza por métodos manuales, empleando:  $\sigma_3^* = F_{cu}(\varepsilon)$ , para las espumas y  $\sigma_3^* = F_{cc}\left(\frac{\bar{p}}{\rho}\right)$ , para las estructuras de paredes delgadas con celdas cerradas.

## 6. Modelo Mecánico

### 6.1. Sistema de Referencia

Sistema cartesiano con ejes X e Y en el plano de impacto y eje Z en la dirección de movimiento.

### 6.2. Geometría

La geometría 3D tiene que representar las formas y dimensiones del problema en cuestión, pero también debe satisfacer ciertos criterios de modelado básico. Para este caso de análisis, la geometría se diseña de modo de evitar el empleo de elementos de contacto innecesarios, facilitando al algoritmo de mallado la creación de una malla única (empleo de comandos 'joint' y 'form a new part'). También se marcan mediante cortes las regiones de aplicación de condiciones de borde y de extracción de resultados.

Una condición geométrica adicional, muy particular, se requiere para el análisis dinámico no lineal de las estructuras colapsables formadas por celdas de paredes delgadas. Todo el análisis dinámico se plantea sobre un modelo geométrico previamente deformado, con el propósito de obtener convergencia en la solución de las ecuaciones. La geometría deformada es una versión alterada de la geometría original, con base en los desplazamientos que presenta el primer modo de inestabilidad geométrica en compresión de las paredes de las celdas. Tal deformada se genera a partir de un análisis de estabilidad lineal, realizado sobre la geometría no deformada. Las perturbaciones inducidas son del orden del 15% de los desplazamientos obtenidos para

el modo normalizado, con perturbaciones máximas del orden de 0.2 mm.

La 'carga de prueba' se modela como un prisma de acero, con dimensiones 100x100x46 mm, y se divide en 8 partes utilizando tres planos ortogonales, en cuya intersección se obtiene un punto que coincide con la posición del Centro de Gravedad (C.G.) de la carga. Dicho punto es de particular interés en el postproceso del análisis, al momento de extraer las curvas de desplazamiento, velocidad y aceleración representativas del movimiento traslacional de la carga de prueba.

Las 8 partes en las que se divide a la carga de prueba se vinculan entre si al nivel de la malla, asignando a los elementos nodos compartidos en las superficies de interfaz de dominios adyacentes.

En especial, el modelado de las estructuras de celdas colapsables requiere incorporar al modelo las superficies 'facesheet' del panel. Esto permite, entre otras cosas, estabilizar los extremos de las celdas y establecer los vínculos necesarios (contacto) entre la estructura colapsable y la carga de prueba.

### 6.3. Modelos de los Materiales y sus Parámetros

#### 6.3.1. Propiedades Físicas y Mecánicas del Acero Estructural - Material de la Carga de Prueba

La 'carga de prueba' se considera construida en acero de baja aleación. Para este material se asume un modelo de tipo elástico lineal e isotrópico, con las siguientes propiedades físicas y mecánicas:

Propiedad	Símbolo	Valor	Unidad	Referencia	Obs.
Densidad	$\rho$	7850	$[\frac{Kg}{m^3}]$	-	-
Módulo de Elasticidad	$E$	200000	[MPa]	-	-
Módulo de Poisson	$\nu$	0.30	[-]	-	-

Cuadro 3: Propiedades físicas y mecánicas de ACERO.

De definir algún tipo de requisito sobre esta pieza, se puede establecer que: *No se permite que el material de la carga de prueba se deforme de manera permanente, ni que rompa.*

#### 6.3.2. Propiedades Físicas y Mecánicas de las Espumas

Como ya se ha mencionado, para las espumas se propone el empleo de un modelo de material fenomenológico, específicamente el *Porosity - Crushable Foam Model* (Ref.: [1]), que es un modelo simplificado para representar las características colapsables de las espumas solicitadas por cargas de impacto no cíclicas.

En líneas generales, el *Crushable Foam Model* establece una relación entre lo que se define como una tensión principal máxima admisible ( $\sigma_p$ ) y la deformación volumétrica del material ( $e$ ). Hace uso de: (i) un modelo de material elástico lineal isotrópico ( $\rho$ ,  $E$  &  $\nu \approx 0$ ), (ii) una 'curva de compactación' ( $\sigma_p$  vs.  $e = \ln(\frac{V_0}{V})$ ) y (iii) la resistencia en tracción última del material ( $F_{tu}$ ). Para cada deformación volumétrica, la tensión principal es calculada con la ley constitutiva elástica lineal y su valor se contrasta con la tensión principal admisible correspondiente de la 'curva de compactación'. Si el valor calculado excede el admisible, entonces el valor calculado es reducido al admisible. El modelo también asume que el Coeficiente de Poisson es nulo.

Adicionalmente, se asume que el material falla en tracción cuando la tensión de tracción actuante supera al valor de  $F_{tu}$ . El análisis se configura para alertar sobre una falla en compresión, cuando los niveles de deformación geométrica superan cierto límite, fijado en 150 %.

Propiedad	Símbolo	Valor	Unidad	Referencia	Obs.
Densidad	$\rho$	28	$[\frac{Kg}{m^3}]$	Ref.: [10]	-
Módulo de Elasticidad	$E$	15	[MPa]	Ref.: [10]	-
Módulo de Elast. en Comp.	$E_c$	10	[MPa]	Ref.: [10]	-
Módulo de Poisson	$\nu$	0.0	[-]	Ref.: [9]	-
Tensión de Falla en Tracción	$F_{tu}$	0.15	[MPa]	Ref.: [10]	-
Tensión de Falla en Compresión	$F_{cu}$	0.175	[MPa]	Ref.: [10]	@ $\varepsilon = 0.1$

Cuadro 4: Propiedades físicas y mecánicas de POLYSTYRENE FOAM BASF 2500.

Def. Volumétrica [-]	Tensión Princ. Máx. [MPa]	Referencia	Obs.
0	0	-	-
0.1	0.175	Ref.: [10]	$F_{cu}$
0.3	0.35	Aprox. curvas Ref.: [5]	$\sim 2\sigma_p @ \varepsilon = 0.1$
0.5	0.525	Aprox. curvas Ref.: [5]	$\sim 3\sigma_p @ \varepsilon = 0.1$
0.75	1.05	Aprox. curvas Ref.: [5]	$\sim 2\sigma_p @ \varepsilon = 0.5$

Cuadro 5: Curva de Compactación - Relación Tensión Principal Máxima vs. Deformación Volumétrica. [POLYSTYRENE FOAM BASF 2500]

Propiedad	Símbolo	Valor	Unidad	Referencia	Obs.
Densidad	$\rho$	20	$[\frac{Kg}{m^3}]$	Ref.: [4]	-
Módulo de Elasticidad	$E$	-	[MPa]	Ref.: [4]	-
Módulo de Elast. en Comp.	$E_c$	4.5	[MPa]	Ref.: [4]	-
Módulo de Poisson	$\nu$	0.0	[-]	Ref.: [9]	-
Tensión de Falla en Tracción	$F_{tu}$	0.05	[MPa]	Ref.: [4]	-
Tensión de Falla en Compresión	$F_{cu}$	0.10	[MPa]	Ref.: [4]	@ $\varepsilon = 0.1$

Cuadro 6: Propiedades físicas y mecánicas de RMAX ISOLITE EXPANDED POLYSTYRENE 20  $\frac{Kg}{m^3}$ .

Def. Volumétrica [-]	Tensión Princ. Máx. [MPa]	Referencia	Obs.
0	0	-	-
0.1	0.10	Ref.: [4]	$F_{cu}$
0.3	0.17	Aprox. curvas Ref.: [4]	-
0.5	0.23	Aprox. curvas Ref.: [4]	-
0.7	0.35	Aprox. curvas Ref.: [4]	-

Cuadro 7: Curva de Compactación - Relación Tensión Principal Máxima vs. Deformación Volumétrica. [RMAX ISOLITE EXPANDED POLYSTYRENE 20  $\frac{Kg}{m^3}$ ]

Propiedad	Símbolo	Valor	Unidad	Referencia	Obs.
Densidad	$\rho$	13	$[\frac{Kg}{m^3}]$	Ref.: [4]	-
Módulo de Elasticidad	$E$	-	[MPa]	Ref.: [4]	-
Módulo de Elast. en Comp.	$E_c$	1.3	[MPa]	Ref.: [4]	-
Módulo de Poisson	$\nu$	0.0	[-]	Ref.: [9]	-
Tensión de Falla en Tracción	$F_{tu}$	0.04	[MPa]	Ref.: [4]	-
Tensión de Falla en Compresión	$F_{cu}$	0.07	[MPa]	Ref.: [4]	@ $\varepsilon = 0.1$

Cuadro 8: Propiedades físicas y mecánicas de RMAX ISOLITE EXPANDED POLYSTYRENE 13  $\frac{Kg}{m^3}$ .

Def. Volumétrica [-]	Tensión Princ. Máx. [MPa]	Referencia	Obs.
0	0	-	-
0.1	0.07	Ref.: [4]	$F_{cu}$
0.3	0.09	Aprox. curvas Ref.: [4]	-
0.5	0.13	Aprox. curvas Ref.: [4]	-
0.72	0.27	Aprox. curvas Ref.: [4]	-

Cuadro 9: Curva de Compactación - Relación Tensión Principal Máxima vs. Deformación Volumétrica. [RMAX ISOLITE EXPANDED POLYSTYRENE 13  $\frac{Kg}{m^3}$ ]

### 6.3.3. Propiedades Físicas y Mecánicas del Papel

Para el papel se utiliza un modelo de material del tipo elástico lineal e isotrópico. Se considera que el material falla cuando la componente principal máxima del tensor de tensiones alcanza el valor de la tensión última en tracción  $F_{tu}$ .

Tipo	Densidad $\rho^*$ [ $\frac{Kg}{m^2}$ ]	Resistencia $F_t$ [ $\frac{N}{m}$ ]	Elongación $e$ [%]	Espesor $t$ [m]
Rag Bond	0.075	3600	1.8	0.00009
Offset	0.107	5550	2.5	0.00013

Cuadro 10: Propiedades mecánicas del papel. (Ref.: [3])

Propiedad	Símbolo	Valor	Unidad	Referencia	Obs.
Densidad	$\rho$	833	$[\frac{Kg}{m^3}]$	-	Ref.: [3] & $\rho = \frac{\rho^*}{t}$
Módulo de Elasticidad	$E$	2000	[MPa]	-	Ref.: [3] & $E \approx \frac{F_{tu}}{e}$
Módulo de Poisson	$\nu$	0.25	[-]	Ref.: [8]	-
Tensión de Falla en Tracción	$F_{tu}$	36.0	[MPa]	-	Ref.: [3] & $F_{tu} = \frac{F_t}{t}$
Tensión de Falla en Compresión	$F_{cu}$	25.2	[MPa]	-	Se asume: $F_{cu} \sim 0,7F_{tu}$

Cuadro 11: Propiedades físicas y mecánicas de PAPER RAG BOND 75  $\frac{g}{m^2}$ . ( $t \approx 0.09$  mm)

Propiedad	Símbolo	Valor	Unidad	Referencia	Obs.
Densidad	$\rho$	833	$[\frac{Kg}{m^3}]$	-	Ref.: [3] & $\rho = \frac{\rho^*}{t}$
Módulo de Elasticidad	$E$	1556	[MPa]	-	Ref.: [3] & $E \approx \frac{F_{tu}}{e}$
Módulo de Poisson	$\nu$	0.25	[-]	Ref.: [8]	-
Tensión de Falla en Tracción	$F_{tu}$	38.9	[MPa]	-	Ref.: [3] & $F_{tu} = \frac{F_t}{t}$
Tensión de Falla en Compresión	$F_{cu}$	27.2	[MPa]	-	Se asume: $F_{cu} \sim 0,7F_{tu}$

Cuadro 12: Propiedades físicas y mecánicas de PAPER OFFSET 107  $\frac{g}{m^2}$ . ( $t \approx 0.13$  mm)

#### 6.4. Vínculos entre Partes (Contactos)

Entre la carga de prueba y el atenuador de impacto se define un contacto no lineal del tipo 'sin fricción', con comportamiento asimétrico, esfera de influencia de 2 mm de radio y configuración 'en contacto' (Adjust to Touch). Se utilizan regiones de contacto independientes para cada división geométrica practicada sobre la carga de prueba, definiendo como superficies 'target' a las del lado de la carga.

Adicionalmente se configura el análisis con auto-contactos de modo de tomar en consideración la posibilidad de que partes de un mismo cuerpo entren en contacto entre sí, como consecuencia de las deformaciones producidas por el impacto. La configuración de este tipo de vínculo resulta especialmente importante para aquellos análisis donde el atenuador de impacto se encuentra formado por una estructura de celdas colapsables.

#### 6.5. Discretización del Dominio de Cálculo (Malla)

Los dominios de cálculo se discretizan utilizando una malla mixta y estructurada, formada por elementos sólidos (carga de prueba & espumas) y del tipo de cáscara (honeycombs), en ambos casos, con elementos de primer orden y formulación para análisis explícitos.

Para la carga de prueba se utilizan elementos sólidos lineales exaédricos, con tamaños en el orden de los 15 mm.

De manera similar a la carga de prueba, para los bloques de espuma se emplean elementos sólidos lineales exaédricos, pero con un tamaño menor, comprendido entre 4 mm y 6 mm (4 mm para 100 mm de espesor, 5 mm para 250 mm de espesor y 6 mm para 450 mm de espesor), en pos de balancear tiempo de cómputo y la precisión de los resultados.

Los atenuadores de impacto del tipo de celdas colapsables de paredes delgadas se modelan geoméricamente a partir de superficies interconectadas. La discretización en este caso se realiza empleando elementos de cáscara lineales, cuadriláteros (en su mayoría) y triangulares, de 2.5 mm de tamaño aproximado.

Para cualesquiera de los casos, no se utilizan controles de proximidad y curvatura.

Con el propósito de generar una discretización estructurada, el proceso de mallado se programa en forma de secuencia ordenada de pasos. Adicionalmente se definen controles de mallado locales, del tipo 'mapped'.

Para los modelos de espuma se emplean mallas de 16000 elementos & 18000 nodos hasta 71000 elementos & 77500 nodos. Para los modelos de celdas colapsables se emplean mallas de 41700 elementos & 40000 nodos hasta 100400 elementos & 94100 nodos.

#### 6.6. Condiciones Iniciales y de Contorno

Justo antes del impacto con el suelo, la carga y el atenuador de impacto, incorporado como parte del packaging, se desplazan verticalmente hacia abajo con una velocidad de descenso definida en 5 m/s.

El impacto se produce cuando la parte inferior del disipador entra en contacto con el suelo; y la simulación se inicia justo en ese instante. Consecuentemente, tanto la carga de prueba como el atenuador deben presentar una velocidad de 5 m/s en la dirección del eje Z, con sentido hacia abajo.

Asumiendo como hipótesis conservativa que la rigidez del suelo es muy alta (100%), se aplica como condición de contorno a la base del atenuador la restricción de los grados de libertad en traslación vertical de todos

los nodos posicionados en dicha región ( $Z = 0$  mm), dejando libres los grados de libertad de tales puntos en el plano de impacto ( $X = Y = \text{free}$ ).

Por último, todo el proceso se realiza bajo la acción de la aceleración de la gravedad (constante):  $g = 9.81 \frac{m}{s^2}$ .

### 6.7. Configuración del Análisis

La simulación del impacto se realiza mediante un análisis dinámico del tipo explícito, considerando un tiempo total de simulación de aproximadamente 0.02 s.

Los elementos utilizados son de primer orden y el motor de cálculo se configura con precisión 'doble'.

Para las espumas, se toma en cuenta su potencial degradación, eliminando automáticamente a aquellos elementos que sufren elevados niveles de deformación, específicamente, mayores al 150% (Geometric Strain Limit = 1.5).

Para las estructuras de celdas colapsables del tipo honeycomb, se realiza un estudio previo de modos de inestabilidad lineal, con el propósito de iniciar el análisis de impacto con una versión levemente deformada de la geometría de las celdas, y así excitar la respuesta inestable en el análisis dinámico no lineal.

### 6.8. Post-Proceso

Todo el estudio se plantea con el propósito de generar y extraer aquella información de utilidad para entender el comportamiento de los absorbedores de energía (conforme con su tecnología y arquitectura) y predecir los parámetros geométricos de un atenuador, necesarios para lograr una respuesta adecuada en el impacto.

De la información generada, resultan de particular interés: el tiempo de impacto, la duración efectiva del choque ( $t_{ef} = \frac{n_{medio}}{n_{max}} t_i = \frac{t_i}{\left(\frac{n_{max}}{n_{medio}}\right)}$ ), la forma de la función de aceleración promedio, el factor de desaceleración (promedio) máximo, la energía disipada ( $E_{disip} = T_{inicial} - T_{final} = \frac{m}{2} (V_{v,inicial}^2 - V_{v,final}^2)$ ), la energía devuelta ( $E_{dev} = T_{final}$ ), la eficiencia del atenuador de impacto ( $\eta = \frac{E_{disip}}{T_{inicial}}$ ), la distancia de desaceleración, el porcentaje de deformación del atenuador, la fuerza máxima (promedio) de impacto, la fuerza estática de colapso, el peso y la densidad del disipador, su volumen de almacenamiento, disponibilidad, costo y transparencia a las señales de radio, entre otros.

Desde esta información y con vistas en el potencial de diseño y dimensionamiento de los atenuadores, se trazan curvas de factores de desaceleración máximos  $n$  en función de la tensión estática  $\sigma_{est}$ , para masas: 0.67, 1.0, 1.5, 2.0 y 2.5 veces la masa de la carga de prueba, y para diferentes tipos y espesores de atenuadores.

### 6.9. Resumen de Casos de Análisis

Caso	Material	Arquitectura	Espesor [mm]
1 (a, b & c)	Polystyrene Foam BASF 2500 28 $\frac{Kg}{m^3}$	Espuma	100, 250 & 450
2 (a, b & c)	RMAX Isolite Expanded Polystyrene 20 $\frac{Kg}{m^3}$	Espuma	100, 250 & 450
3 (a, b & c)	RMAX Isolite Expanded Polystyrene 13 $\frac{Kg}{m^3}$	Espuma	100, 250 & 450
4 (a & b)	Papel RAG BOND 75 $\frac{g}{m^2}$ ( $t \approx 0.09$ mm)	Honeycomb	100 & 250
5 (a & b)	Papel OFFSET 107 $\frac{g}{m^2}$ ( $t \approx 0.13$ mm)	Honeycomb	100 & 250

Cuadro 13: Tabla resumen de casos de análisis. La combinación de tipos de análisis (dinámico y estático), de diferentes materiales, arquitecturas y espesores de loa atenuadores, devuelven un total de 27 casos de estudio a ser considerados.

## 7. Resultados

### 7.1. Espumas Poliméricas

Resultado	Símbolo	Unidad	Criterio	Valor
Volumen de Almacenamiento	$V_{almac,disip}$	$[m^3]$	Mínimo	Alto
Disponibilidad	-	-	-	Sí
Costo	$C$	$[\frac{USD}{m^3}]$	Mínimo	-
Transparencia (Señales de Radio)	-	-	-	Alta

Cuadro 14: Características de Interés de las Espumas como Material Disipador.

Resultado	Símbolo	Unidad	Criterio	Caso 'a'	Caso 'b'	Caso 'c'
Tiempo de Impacto	$t_i$	$[s]$	-	0.0110	0.0169	0.0220
Duración Efectiva	$t_{ef}$	$[s]$	-	0.0038	0.0093	0.0117
Factor de Desaceleración Máximo	$n_{max}$	$[-]$	$10 < n < 35$	91.5	62.3	51.9
Factor de Desaceleración Medio	$n_{medio}$	$[-]$	-	31.8	34.2	27.7
-	$\frac{n_{max}}{n_{medio}}$	$[-]$	-	2.87	1.82	1.88
Forma	-	-	-	$\cap$	$\cap$	$\cap$
Energía Disipada	$E_{disipada}$	$[J]$	Máxima	41.3	39.8	38.5
Energía Devuelta	$E_{devuelta}$	$[J]$	Mínima	3.85	5.31	6.66
Eficiencia del Atenuador	$\eta$	$[-]$	Máxima	0.91	0.88	0.85
Distancia de Desaceleración	$d$	$[mm]$	$d \geq 80 mm$	24.8	37.2	49.2
Deformación	$\epsilon_{max}$	$[\%]$	$< 70 \%$	24.8	14.9	10.9
Fuerza Media de Impacto	$P_{i,media}$	$[N]$	-	1127	1212	981
Fuerza Máxima de Impacto	$P_{i,max}$	$[N]$	-	3240	2207	1839
Efectos Erosivos	-	-	Deseables	Leves	Ninguno	Ninguno
Tensión de Colapso (Estático)	$F_{cr}$	$[MPa]$	-	0.305	0.218	0.183
Fuerza de Colapso (Estático)	$P_{cr}$	$[N]$	-	3050	2180	1830
Relación Dinámica-Estática (Máx.)	$r_{max} = \frac{P_{i,max}}{P_{cr}}$	$[-]$	$\approx 1$	1.06	1.01	1.00
Masa del Disipador	$m_{disipador}$	$[Kg]$	Mínimo	0.028	0.070	0.126

Cuadro 15: Resumen de Resultados [CASO 1: Polystyrene Foam BASF 2500].

Eficiencia	Tensión Estática	Deformación	Factor de Desaceleración Máximo
$\eta$ $[-]$	$\sigma_{est}$ $[KPa]$	$\epsilon_{max}$ $[\%]$	$n_{max}$ $[-]$
0.90	2.36	19.6	113.9
0.91	3.54	24.8	91.5
0.95	5.31	31.5	67.9
0.94	7.08	36.9	55.6
0.97	8.85	42.1	47.1

Cuadro 16: Factor de Desaceleración Máximo en función de la Tensión Estática:  $V_{impacto} = 5$  m/s &  $t_{atenuador} = 100$  mm [CASO 1: Polystyrene Foam BASF 2500].

Eficiencia	Tensión Estática	Deformación	Factor de Desaceleración Máximo
$\eta$ [-]	$\sigma_{est}$ [KPa]	$\varepsilon_{max}$ [%]	$n_{max}$ [-]
0.86	2.36	11.9	81.8
0.88	3.54	14.9	62.3
0.90	5.31	18.7	49.0
0.92	7.08	22.1	41.0
0.93	8.85	25.2	34.4

Cuadro 17: Factor de Desaceleración Máximo en función de la Tensión Estática:  $V_{impacto} = 5$  m/s &  $t_{atenuador} = 250$  mm [CASO 1: Polystyrene Foam BASF 2500].

Eficiencia	Tensión Estática	Deformación	Factor de Desaceleración Máximo
$\eta$ [-]	$\sigma_{est}$ [KPa]	$\varepsilon_{max}$ [%]	$n_{max}$ [-]
0.83	2.36	8.9	66.4
0.85	3.54	10.9	51.9
0.88	5.31	13.6	38.8
0.89	7.08	15.9	32.0
0.92	8.85	18.2	28.0

Cuadro 18: Factor de Desaceleración Máximo en función de la Tensión Estática:  $V_{impacto} = 5$  m/s &  $t_{atenuador} = 450$  mm [CASO 1: Polystyrene Foam BASF 2500].

Resultado	Símbolo	Unidad	Criterio	Caso 'a'	Caso 'b'	Caso 'c'
Tiempo de Impacto	$t_i$	[s]	-	0.0184	0.0251	0.0312
Duración Efectiva	$t_{ef}$	[s]	-	0.0102	0.0140	0.0181
Factor de Desaceleración Máximo	$n_{max}$	[-]	$10 < n < 35$	52.0	38.3	33.4
Factor de Desaceleración Medio	$n_{medio}$	[-]	-	28.7	21.4	19.5
-	$\frac{n_{max}}{n_{medio}}$	[-]	-	1.81	1.79	1.72
Forma	-	-	-	$\cap$	$\cap$	$\cap$
Energía Disipada	$E_{disipada}$	[J]	Máxima	44.4	41.8	39.4
Energía Devuelta	$E_{devuelta}$	[J]	Mínima	0.71	3.32	5.69
Eficiencia del Atenuador	$\eta$	[-]	Máxima	0.98	0.93	0.87
Distancia de Desaceleración	$d$	[mm]	$d \geq 80$ mm	37.7	53.1	67.7
Deformación	$\varepsilon_{max}$	[%]	$< 70$ %	37.7	21.2	15.0
Fuerza Media de Impacto	$P_{i,media}$	[N]	-	1018	758	689
Fuerza Máxima de Impacto	$P_{i,max}$	[N]	-	1842	1355	1183
Efectos Erosivos	-	-	Deseables	Medios	Medios	Ninguno
Tensión de Colapso (Estático)	$F_{cr}$	[MPa]	-	0.193	0.139	0.118
Fuerza de Colapso (Estático)	$P_{cr}$	[N]	-	1930	1390	1183
Relación Dinámica-Estática (Máx.)	$r_{max} = \frac{P_{i,max}}{P_{cr}}$	[-]	$\approx 1$	0.95	0.97	1.00
Masa del Disipador	$m_{disipador}$	[Kg]	Mínimo	0.020	0.050	0.090

Cuadro 19: Resumen de Resultados [CASO 2: RMAX Isolite Expanded Polystyrene 20  $\frac{Kg}{m^3}$ ].

Eficiencia	Tensión Estática	Deformación	Factor de Desaceleración Máximo
$\eta$ [-]	$\sigma_{est}$ [KPa]	$\varepsilon_{max}$ [%]	$n_{max}$ [-]
0.94	2.36	28.9	68.1
0.98	3.54	37.7	52.0
1.00	5.31	54.2	38.1
-	7.08	-	-
-	8.85	-	-

Cuadro 20: Factor de Desaceleración Máximo en función de la Tensión Estática:  $V_{impacto} = 5$  m/s &  $t_{atenuador} = 100$  mm [CASO 2: RMAX Isolite Expanded Polystyrene 20  $\frac{Kg}{m^3}$ ].

Eficiencia	Tensión Estática	Deformación	Factor de Desaceleración Máximo
$\eta$ [-]	$\sigma_{est}$ [KPa]	$\varepsilon_{max}$ [%]	$n_{max}$ [-]
0.88	2.36	16.5	51.7
0.93	3.54	21.2	39.6
0.94	5.31	27.4	29.9
0.99	7.08	33.2	25.8
-	8.85	38.4	19.7

Cuadro 21: Factor de Desaceleración Máximo en función de la Tensión Estática:  $V_{impacto} = 5$  m/s &  $t_{atenuador} = 250$  mm [CASO 2: RMAX Isolite Expanded Polystyrene 20  $\frac{Kg}{m^3}$ ].

Eficiencia	Tensión Estática	Deformación	Factor de Desaceleración Máximo
$\eta$ [-]	$\sigma_{est}$ [KPa]	$\varepsilon_{max}$ [%]	$n_{max}$ [-]
-	2.36	11.9	44.8
0.87	3.54	15.0	33.1
0.91	5.31	19.3	24.2
0.92	7.08	23.2	20.1
0.99	8.85	26.9	16.9

Cuadro 22: Factor de Desaceleración Máximo en función de la Tensión Estática:  $V_{impacto} = 5$  m/s &  $t_{atenuador} = 450$  mm [CASO 2: RMAX Isolite Expanded Polystyrene 20  $\frac{Kg}{m^3}$ ].

Resultado	Símbolo	Unidad	Criterio	Caso 'a'	Caso 'b'	Caso 'c'
Tiempo de Impacto	$t_i$	[s]	-	0.0261	0.0370	0.0342
Duración Efectiva	$t_{ef}$	[s]	-	0.0138	0.0218	0.0198
Factor de Desaceleración Máximo	$n_{max}$	[-]	$10 < n < 35$	28.7	22.5	22.3
Factor de Desaceleración Medio	$n_{medio}$	[-]	-	15.2	13.2	12.9
-	$\frac{n_{max}}{n_{medio}}$	[-]	-	1.89	1.70	1.73
Forma	-	-	-	$\cap$	$\cap$	$\cap$
Energía Disipada	$E_{disipada}$	[J]	Máxima	44.5	45.1	44.6
Energía Devuelta	$E_{devuelta}$	[J]	Mínima	0.61	0.01	0.55
Eficiencia del Atenuador	$\eta$	[-]	Máxima	0.99	1.00	0.99
Distancia de Desaceleración	$d$	[mm]	$d \geq 80 \text{ mm}$	66.6	79.3	93.9
Deformación	$\varepsilon_{max}$	[%]	$< 70 \%$	66.6	31.7	20.9
Fuerza Media de Impacto	$P_{i,media}$	[N]	-	538	468	458
Fuerza Máxima de Impacto	$P_{i,max}$	[N]	-	1018	797	792
Efectos Erosivos	-	-	Deseables	Severos	Severos	Medios
Tensión de Colapso (Estático)	$F_{cr}$	[MPa]	-	0.236	0.093	0.081
Fuerza de Colapso (Estático)	$P_{cr}$	[N]	-	2360	930	810
Relación Dinámica-Estática (Máx.)	$r_{max} = \frac{P_{i,max}}{P_{cr}}$	[-]	$\approx 1$	0.43	0.86	0.98
Masa del Disipador	$m_{disipador}$	[Kg]	Mínimo	0.013	0.033	0.059

 Cuadro 23: Resumen de Resultados [CASO 3: RMAX Isolite Expanded Polystyrene 13  $\frac{Kg}{m^3}$ ].

Eficiencia	Tensión Estática	Deformación	Factor de Desaceleración Máximo
$\eta$ [-]	$\sigma_{est}$ [KPa]	$\varepsilon_{max}$ [%]	$n_{max}$ [-]
0.99	2.36	44.9	38.1
0.99	3.54	63.6	28.7
-	5.31	-	-
-	7.08	-	-
-	8.85	-	-

 Cuadro 24: Factor de Desaceleración Máximo en función de la Tensión Estática:  $V_{impacto} = 5 \text{ m/s}$  &  $t_{atenuador} = 100 \text{ mm}$  [CASO 3: RMAX Isolite Expanded Polystyrene 13  $\frac{Kg}{m^3}$ ].

Eficiencia	Tensión Estática	Deformación	Factor de Desaceleración Máximo
$\eta$ [-]	$\sigma_{est}$ [KPa]	$\varepsilon_{max}$ [%]	$n_{max}$ [-]
0.98	2.36	23.0	31.3
1.00	3.54	30.5	22.5
-	5.31	40.9	17.8
-	7.08	-	-
-	8.85	-	-

 Cuadro 25: Factor de Desaceleración Máximo en función de la Tensión Estática:  $V_{impacto} = 5 \text{ m/s}$  &  $t_{atenuador} = 250 \text{ mm}$  [CASO 3: RMAX Isolite Expanded Polystyrene 13  $\frac{Kg}{m^3}$ ].

Eficiencia	Tensión Estática	Deformación	Factor de Desaceleración Máximo
$\eta$ [-]	$\sigma_{est}$ [KPa]	$\varepsilon_{max}$ [%]	$n_{max}$ [-]
0.78	2.36	15.0	30.4
0.95	3.54	19.8	21.5
-	5.31	27.3	14.2
-	7.08	32.5	10.9
-	8.85	35.6	8.1

Cuadro 26: Factor de Desaceleración Máximo en función de la Tensión Estática:  $V_{impacto} = 5$  m/s &  $t_{atenuador} = 450$  mm [CASO 2: RMAX Isolite Expanded Polystyrene 13  $\frac{Kg}{m^3}$ ].

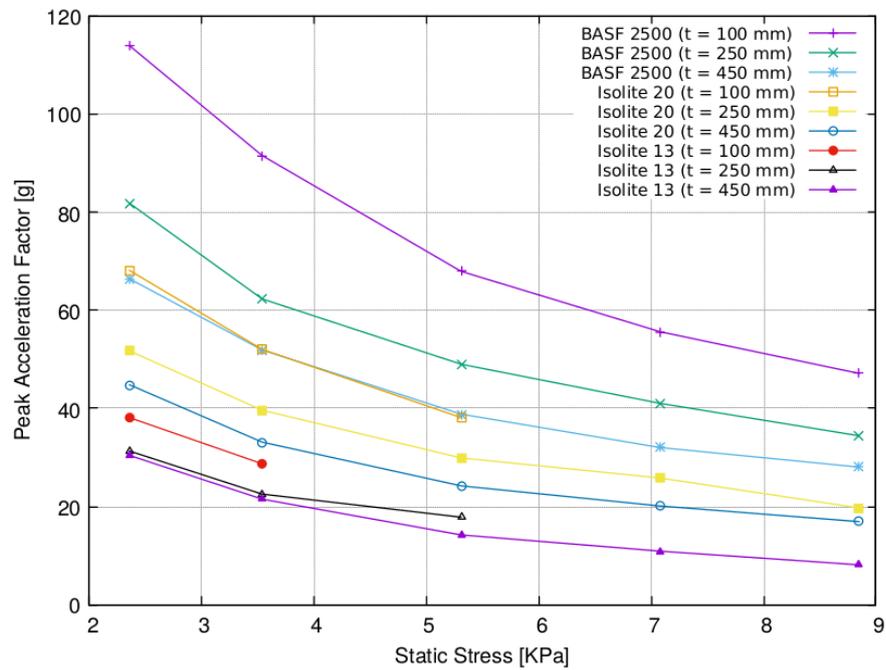


Figura 2: Curvas de Factor de Desaceleración Máximo en función de la Tensión Estática, obtenidas para las espumas poliméricas estudiadas. ( $V_{impacto} = 5$  m/s)

## 7.2. Estructuras de Celdas Colapsables Exagonales del Tipo Honeycomb

Desplazamiento modo buckling máximo: 1.36 mm Perturbación máxima: 0.20 mm

Resultado	Símbolo	Unidad	Criterio	Caso 'a'	Caso 'b'
Tiempo de Impacto	$t_i$	[s]	-	0.0142	0.0163
Duración Efectiva	$t_{ef}$	[s]	-	0.0083	0.0127
Factor de Desaceleración de Pico	$n_{pico}$	[-]	$10 < n < 35$	64.2	86.4
Factor de Desaceleración Crítico	$n_{crit}$	[-]	$10 < n < 35$	45.6	39.3
Factor de Desaceleración Medio	$n_{medio}$	[-]	-	26.5	30.6
-	$\frac{n_{pico}}{n_{medio}}$	[-]	-	2.43	2.83
-	$\frac{n_{crit}}{n_{medio}}$	[-]	-	1.72	1.28
Forma	-	-	-	~	~
Energía Disipada	$E_{disipada}$	[J]	Máxima	43.9	42.1
Energía Devuelta	$E_{devuelta}$	[J]	Mínima	1.24	3.08
Eficiencia del Atenuador	$\eta$	[-]	Máxima	0.97	0.93
Distancia de Desaceleración	$d$	[mm]	$d \geq 80 \text{ mm}$	23.5	22.8
Deformación	$\varepsilon_{max}$	[%]	$< 70 \%$	23.5	9.1
Fuerza Media de Impacto	$P_{i,media}$	[N]	-	937	1082
Fuerza Media de Pico de Impacto	$P_{i,pico}$	[N]	-	2273	3061
Fuerza Crítica de Impacto	$P_{i,crit}$	[N]	-	1617	1391
Efectos Erosivos	-	-	-	Ninguno	Ninguno
Tensión de Colapso (Estático)	$F_{cr}$	[MPa]	-	0.152	0.152
Fuerza de Colapso (Estático)	$P_{cr}$	[N]	-	1524	1524
Relación Dinámica-Estática (Máx.)	$r_{max} = \frac{P_{i,crit}}{P_{cr}}$	[-]	$\approx 1$	1.06	0.91
Masa del Disipador	$m_{disipador}$	[Kg]	Mínimo	0.0195	0.0476
Densidad del Disipador	$\bar{\rho}$	$[\frac{Kg}{m^3}]$	-	19.5	19.5
Volumen de Almacenamiento	$\frac{V_{almac,disip}}{V_{disip}}$	[-]	Mínimo	0.0234	0.0229

Cuadro 27: Resumen de Resultados [CASO 4: Papel RAG BOND 75  $\frac{g}{m^2}$  ( $t \approx 0.09 \text{ mm}$ ) - Celdas: 17 mm, 6 mm & 12 mm].

Eficiencia	Tensión Estática	Deformación	F. de Desac. de Pico	F. de Desac. Crítico
$\eta$ [-]	$\sigma_{est}$ [KPa]	$\varepsilon_{max}$ [%]	$n_{pico}$ [-]	$n_{crit}$ [-]
0.95	2.36	14.5	100.1	85.8
0.97	3.54	23.5	64.2	45.6
0.98	5.31	38.6	43.3	30.2
-	7.08	51.2	40.6	23.8
-	8.85	-	-	-

Cuadro 28: Factor de Desaceleración Máximo en función de la Tensión Estática:  $V_{impacto} = 5 \text{ m/s}$  &  $t_{atenuador} = 100 \text{ mm}$  [CASO 4: Papel RAG BOND 75  $\frac{g}{m^2}$  ( $t \approx 0.09 \text{ mm}$ ) - Celdas: 17 mm, 6 mm & 12 mm].

Eficiencia	Tensión Estática	Deformación	F. de Desac. de Pico	F. de Desac. Crítico
$\eta$ [-]	$\sigma_{est}$ [KPa]	$\varepsilon_{max}$ [%]	$n_{pico}$ [-]	$n_{crit}$ [-]
0.85	2.36	3.9	162.1	101.3
0.93	3.54	9.1	86.4	39.0
0.96	5.31	12.5	64.9	28.1
-	7.08	17.8	56.3	24.1
0.97	8.85	24.8	29.3	15.7

Cuadro 29: Factor de Desaceleración Máximo en función de la Tensión Estática:  $V_{impacto} = 5 \text{ m/s}$  &  $t_{atenuador} = 250 \text{ mm}$  [CASO 4: Papel RAG BOND 75  $\frac{g}{m^2}$  ( $t \approx 0.09 \text{ mm}$ ) - Celdas: 17 mm, 6 mm & 12 mm].

Resultado	Símbolo	Unidad	Criterio	Caso 'a'	Caso 'b'
Tiempo de Impacto	$t_i$	[s]	-	0.0088	0.0101
Duración Efectiva	$t_{ef}$	[s]	-	0.0068	0.0044
Factor de Desaceleración de Pico	$n_{pico}$	[-]	$10 < n < 35$	109.1	116.9
Factor de Desaceleración Crítico	$n_{crit}$	[-]	$10 < n < 35$	85.4	77.3
Factor de Desaceleración Medio	$n_{medio}$	[-]	-	65.9	33.4
-	$\frac{n_{pico}}{n_{medio}}$	[-]	-	3.84	3.50
-	$\frac{n_{crit}}{n_{medio}}$	[-]	-	1.30	2.31
Forma	-	-	-	~	~
Energía Disipada	$E_{disipada}$	[J]	Máxima	41.8	37.8
Energía Devuelta	$E_{devuelta}$	[J]	Mínima	3.37	7.29
Eficiencia del Atenuador	$\eta$	[-]	Máxima	0.93	0.84
Distancia de Desaceleración	$d$	[mm]	$d \geq 80 \text{ mm}$	14.2	13.8
Deformación	$\varepsilon_{max}$	[%]	$< 70 \%$	14.2	5.5
Fuerza Media de Impacto	$P_{i,media}$	[N]	-	2335	1183
Fuerza Media de Pico de Impacto	$P_{i,pico}$	[N]	-	3864	4141
Fuerza Crítica de Impacto	$P_{i,crit}$	[N]	-	3024	2738
Efectos Erosivos	-	-	-	Ninguno	Ninguno
Tensión de Colapso (Estático)	$F_{cr}$	[MPa]	-	0.272	0.272
Fuerza de Colapso (Estático)	$P_{cr}$	[N]	-	2721	2721
Relación Dinámica-Estática (Máx.)	$r_{max} = \frac{P_{i,crit}}{P_{cr}}$	[-]	$\approx 1$	1.11	1.01
Masa del Disipador	$m_{disipador}$	[Kg]	Mínimo	0.0282	0.0705
Densidad del Disipador	$\bar{\rho}$	$[\frac{Kg}{m^3}]$	-	28.2	28.2
Volumen de Almacenamiento	$\frac{V_{almac,disip}}{V_{disip}}$	[-]	Mínimo	0.0338	-

Cuadro 30: Resumen de Resultados [CASO 5: Papel OFFSET 107  $\frac{g}{m^2}$  ( $t \approx 0.13 \text{ mm}$ ) - Celdas: 17 mm, 6 mm & 12 mm].

Eficiencia	Tensión Estática	Deformación	F. de Desac. de Pico	F. de Desac. Crítico
$\eta$ [-]	$\sigma_{est}$ [KPa]	$\varepsilon_{max}$ [%]	$n_{pico}$ [-]	$n_{crit}$ [-]
0.85	2.36	7.3	196.2	163.2
0.93	3.54	14.2	109.1	85.4
0.94	5.31	19.0	76.5	61.7
0.96	7.08	27.0	66.9	41.2
0.97	8.85	31.3	-	36.0

Cuadro 31: Factor de Desaceleración Máximo en función de la Tensión Estática:  $V_{impacto} = 5 \text{ m/s}$  &  $t_{atenuador} = 100 \text{ mm}$  [CASO 5: Papel OFFSET 107  $\frac{g}{m^2}$  ( $t \approx 0.13 \text{ mm}$ ) - Celdas: 17 mm, 6 mm & 12 mm].

Eficiencia	Tensión Estática	Deformación	F. de Desac. de Pico	F. de Desac. Crítico
$\eta$ [-]	$\sigma_{est}$ [KPa]	$\varepsilon_{max}$ [%]	$n_{pico}$ [-]	$n_{crit}$ [-]
0.59	2.36	2.8	220.7	131.3
0.84	3.54	5.5	116.9	76.2
0.93	5.31	6.8	106.4	38.3
0.95	7.08	11.0	78.9	30.1
-	8.85	17.0	65.3	22.9

Cuadro 32: Factor de Desaceleración Máximo en función de la Tensión Estática:  $V_{impacto} = 5 \text{ m/s}$  &  $t_{atenuador} = 250 \text{ mm}$  [CASO 5: Papel OFFSET 107  $\frac{g}{m^2}$  ( $t \approx 0.13 \text{ mm}$ ) - Celdas: 17 mm, 6 mm & 12 mm].

Eficiencia	Tensión Estática	Deformación	F. de Desac. de Pico	F. de Desac. Crítico
$\eta$ [-]	$\sigma_{est}$ [KPa]	$\varepsilon_{max}$ [%]	$n_{pico}$ [-]	$n_{crit}$ [-]
-	2.36	-	-	-
0.95	3.54	19.1	79.4	66.5
0.97	5.31	28.8	51.2	43.6
0.96	7.08	26.3	61.9	42.2
0.97	8.85	33.8	43.9	34.4

Cuadro 33: Factor de Desaceleración Máximo en función de la Tensión Estática:  $V_{impacto} = 5$  m/s &  $t_{atenuador} = 100$  mm [CASO 5 (EXTRA): Papel OFFSET 107  $\frac{g}{m^2}$  ( $t \approx 0.13$  mm) - Celdas: 20 mm, 9 mm & 15 mm].

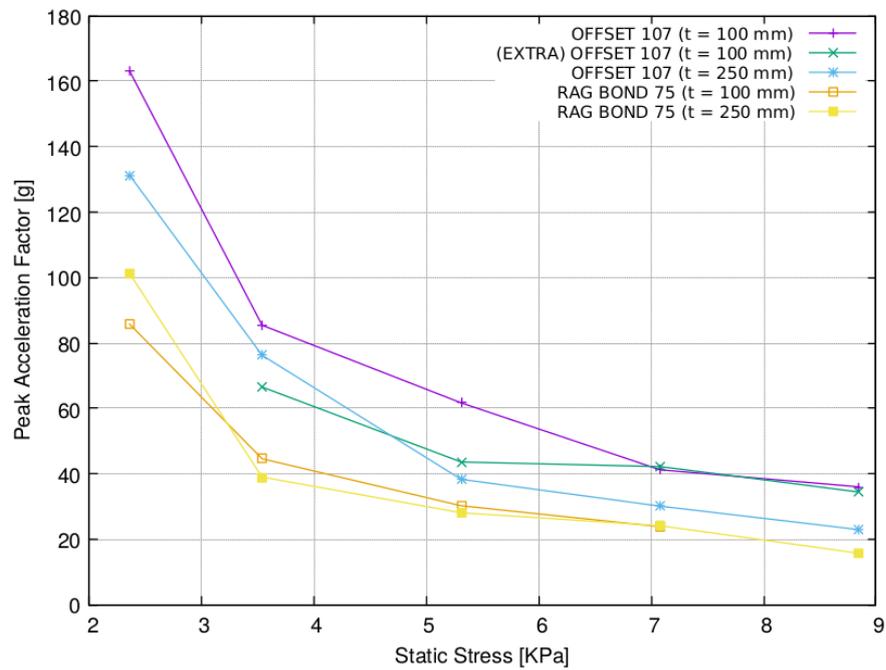


Figura 3: Curvas de Factor de Desaceleración Máximo en función de la Tensión Estática, obtenidas para las estructuras de celdas colapsables estudiadas. ( $V_{impacto} = 5$  m/s)

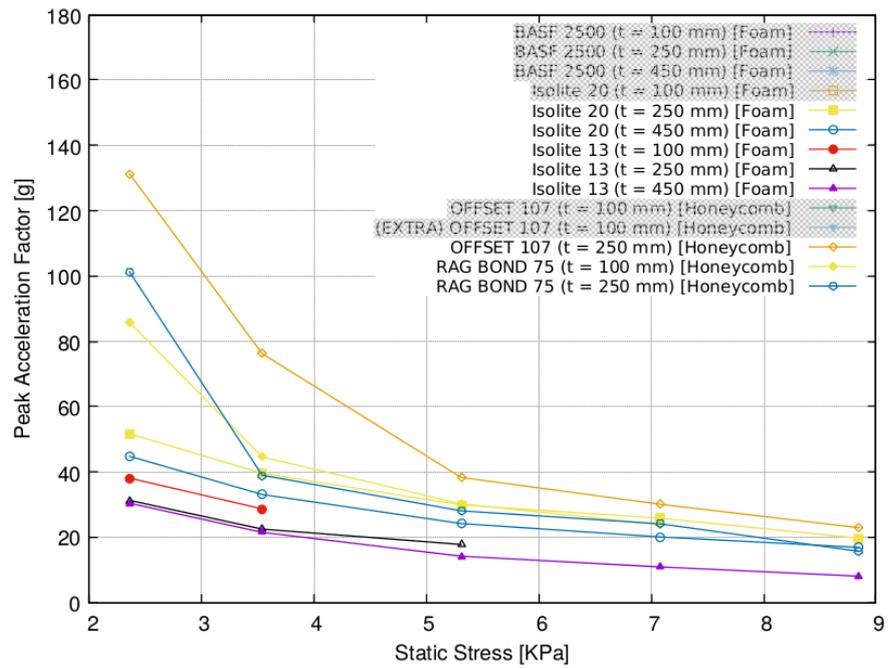


Figura 4: Curvas de Factor de Desaceleración Máximo en función de la Tensión Estática, obtenidas para diferentes materiales y estructuras colapsables estudiadas, candidatas a ser utilizados como atenuadores de impacto. ( $V_{\text{impacto}} = 5 \text{ m/s}$ )

Notar que, cuanto más cerca de cero llega la curva, mejor es la capacidad de absorción de energía en el impacto y que, cuanto más amplia/plana es la base de la curva, más flexible es el material para ser empleado para diferentes cargas/presiones estáticas.

### Parte III

# Ensayos de Laboratorio Realizados sobre Materiales Colapsables Disponibles en el Mercado Local

## 8. Respuesta a Impacto de Espumas Poliméricas de Baja Densidad

En este apartado se presentan datos de ensayos obtenidos a partir de mediciones realizadas durante ensayos de impacto sobre diferentes materiales/estructuras colapsables.

El experimento consiste en medir las aceleraciones producidas sobre una masa de 3.7 Kg, al ser desacelerada de 5.5 m/s a 0 m/s, a través del sacrificio de materiales/estructuras de tipo colapsables.

El montaje experimental se diseña de modo que cada test represente las consecuencias del impacto que sufre una carga de 100 Kg que golpea sobre el suelo (considerado 100 % rígido) a una velocidad de 5.5 m/s y sobre un área de 0.36 m<sup>2</sup>. Así, el área de impacto utilizada en el montaje de ensayo es de 0.01 m<sup>2</sup>.

Resulta especialmente difícil encontrar materiales en el mercado local que puedan ser efectivamente utilizados con el propósito buscado. En consecuencia se ha limitado la evaluación a especímenes contruidos en espuma polimérica de baja densidad y estructuras colapsables de cartón/papel en forma de celdas hexagonales (honeycomb).

La figura 5 muestra una gráfica de Factor de Desaceleración en el Impacto [g] como una función del Tiempo [s], en la que se agrupan 5 respuestas de probetas de espuma polimérica de 10 Kg/m<sup>3</sup><sup>5</sup> con dimensiones 100x100x100 mm. El Factor de Desaceleración Máximo resulta en 54.0 g y el material disipa tan solo un 49% de la energía total de impacto. La energía devuelta resulta tan alta que la parte de la curva graficada corresponde tan solo al primer impacto entre los tantos captados como consecuencia de múltiples rebotes de la masa.

La figura 6 muestra curvas similares, pero cuando las dimensiones son 100x100x200 mm (mismo material). Así, el Factor de Desaceleración Máximo es de 32.0 g y se disipa solamente el 45% de la energía total. Nuevamente, el material devuelve tanta energía que la parte de la curva graficada corresponde tan solo al primer impacto.

El Cuadro 34 proporciona información ampliada sobre parámetros específicos relacionados con el ensayo de la espuma polimérica de 10 Kg/m<sup>3</sup><sup>6</sup>.

<sup>5</sup>Material muy similar al utilizado actualmente por el Ejército.

<sup>6</sup>Espumas de mayores densidades no fueron examinadas por ser previsible su respuesta con Factores de Desaceleración muy superiores a los permisibles (Ver Cuadro 1).

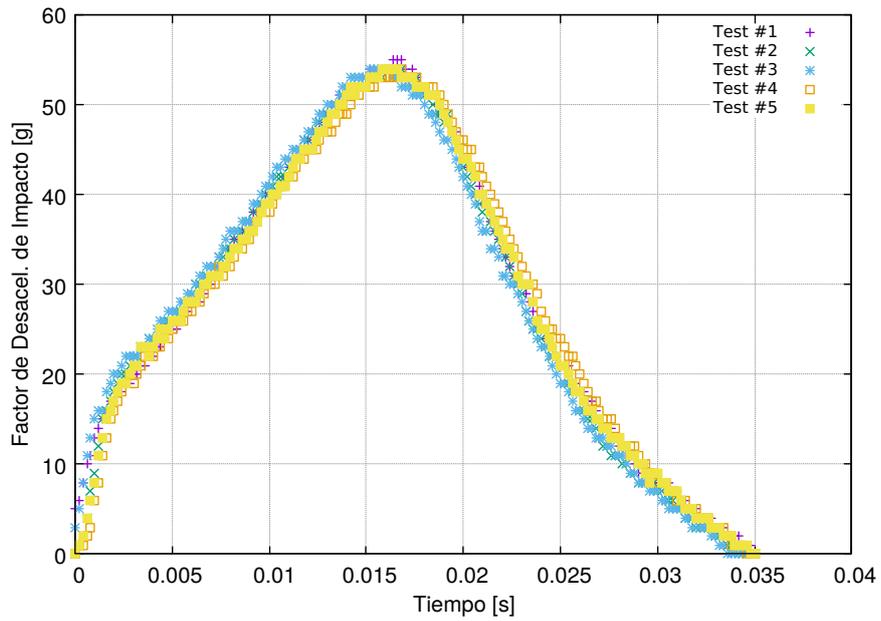


Figura 5: Historia del Factor de Desaceleración en el Impacto en función del tiempo para un espécimen de foam de  $10 \text{ Kg/m}^3$  y 100 mm de espesor, cuando es sometido al impacto de una masa de 3.7 Kg con una velocidad de 5.6 m/s.

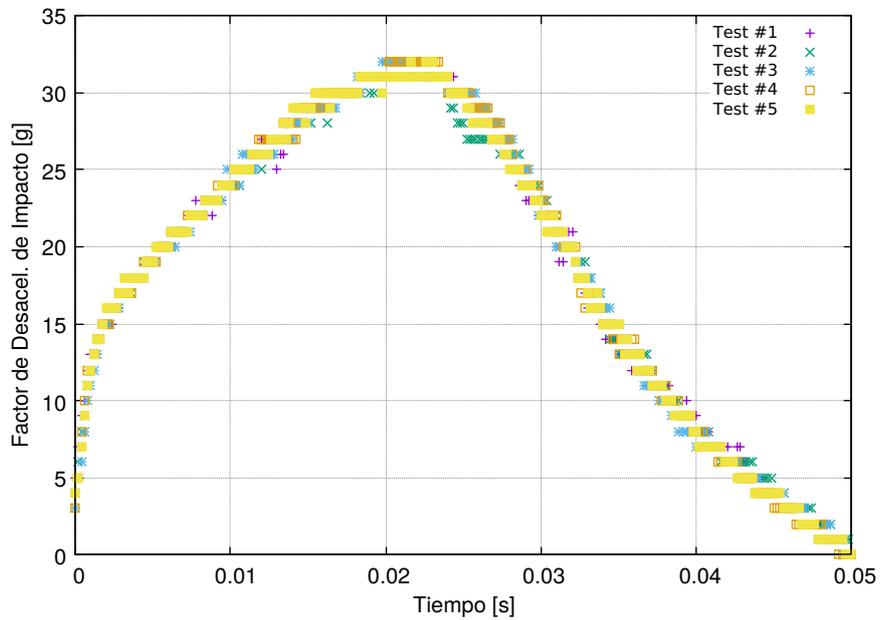


Figura 6: Historia del Factor de Desaceleración en el Impacto en función del tiempo para un espécimen de foam de  $10 \text{ Kg/m}^3$  y 200 mm de espesor, cuando es sometido al impacto de una masa de 3.7 Kg con una velocidad de 5.4 m/s.

Resultado	Símbolo	Unidad	Criterio	t = 100 mm	t = 200 mm
Tiempo de Impacto	$t_i$	[s]	-	$0.032 \pm 0.004$	$0.048 \pm 0.009$
Factor de Desaceleración Máximo	$n_{max}$	[-]	$10 < n < 35$	$54.0 \pm 0.6$	$31.7 \pm 0.4$
Forma	-	-	-	$\cap$	$\cap$
Energía Disipada	$E_{disipada}$	[J]	Máxima	58.4	54.7
Energía Devuelta	$E_{devuelta}$	[J]	Mínima	$\sim 30$	$\sim 30$
Eficiencia del Atenuador	$\eta$	[-]	Máxima	0.49	0.45
Fuerza Máxima de Impacto	$P_{i,max}$	[N]	-	$1960 \pm 22$	$1151 \pm 15$
Efectos Erosivos	-	-	Deseables	Ninguno	Ninguno
Masa del Disipador	$m_{disipador}$	[Kg]	Mínimo	0.010	0.020

Cuadro 34: Resumen de Resultados: Espuma Polimérica 10 Kg/m<sup>3</sup>.

## 9. Respuesta a Impacto del Honeycomb de Papel

La siguiente figura agrupa las respuestas de 2 probetas de honeycomb de cartón ( $t = 0.25$  mm) con celdas hexagonales de dimensiones  $b = 6$  mm,  $h = 8$  mm y  $\alpha = 45^\circ$ . Las dimensiones de las probetas, son: 100x100x100 mm.

El Factor de Desaceleración Máximo resulta en 62.0 g, mientras que el valor definido como crítico es de 55.0 g, y la estructura colapsable disipa aproximadamente un 97 % de la energía total de impacto, no dando lugar a ningún tipo de rebote.

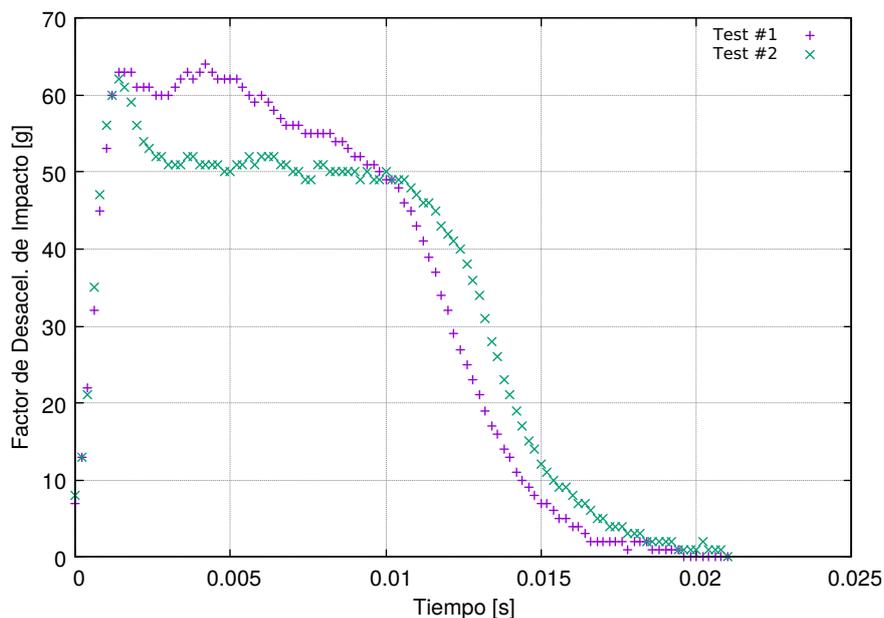


Figura 7: Historia del Factor de Desaceleración en el Impacto en función del tiempo para un espécimen de honeycomb de cartón, con celdas hexagonales de dimensiones  $b = 6$  mm,  $h = 8$  mm y  $\alpha = 45^\circ$ , y con un espesor del atenuador de 100 mm, cuando es sometido al impacto de una masa de 3.7 Kg con una velocidad de 5.6 m/s.

La siguiente figura agrupa 6 respuestas al impacto de honeycomb construido en papel tipo Rag Bond de 75 g/m<sup>2</sup> ( $t = 0.09$  mm) con celdas hexagonales de dimensiones  $b = 6$  mm,  $h = 13$  mm y  $\alpha = 4^\circ$  (fabricado artesanalmente y defectos significativos). Las dimensiones de las probetas, son: 100x100x200 mm.

El Factor de Desaceleración Máximo devuelto en este caso es de 15.0 g, mientras que el crítico resulta en 12.5 g, y se disipa aproximadamente el 99 % de la energía total, haciendo improbable cualquier tipo de rebote.

El Cuadro 35 proporciona información ampliada sobre parámetros específicos relacionados con el ensayo de los paneles de honeycomb de papel ensayados.

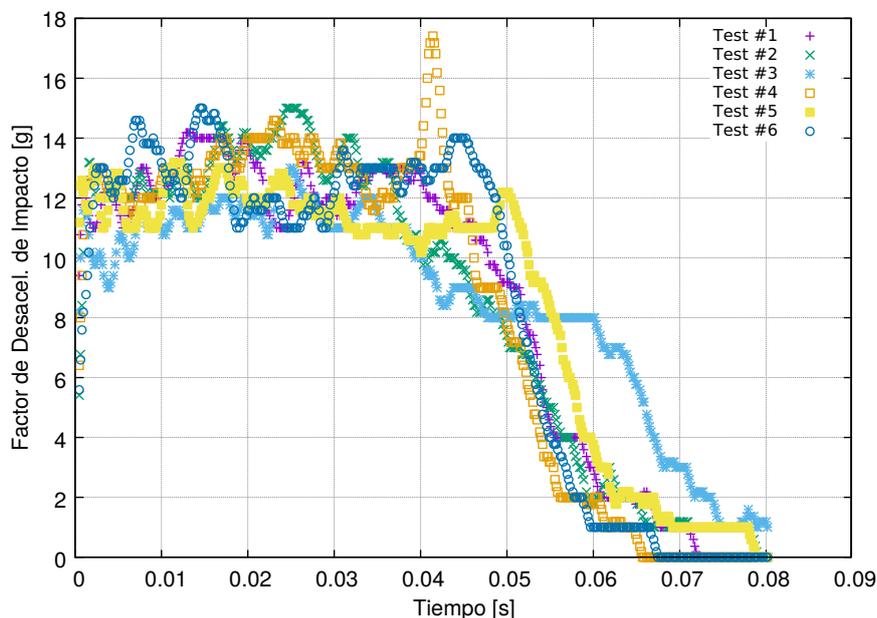


Figura 8: Historia del Factor de Desaceleración en el Impacto en función del tiempo para un espécimen de honeycomb de papel tipo Rag Bond 75 g/m<sup>2</sup>, con celdas hexagonales de dimensiones b = 6 mm, h = 13 mm y  $\alpha = 48^\circ$ , y con un espesor del atenuador de 200 mm, cuando es sometido al impacto de una masa de 3.7 Kg con una velocidad de 5.5 m/s.

Resultado	Símbolo	Unidad	Criterio	Paperboard	Rag Bond 75
Tiempo de Impacto	$t_i$	[s]	-	0.022 ± 0.000	0.089 ± 0.006
Factor de Desaceleración de Pico	$n_{pico}$	[-]	10 < n < 35	62 ± 0	15 ± 2
Factor de Desaceleración Crítico	$n_{crit}$	[-]	10 < n < 35	55 ± 7	12.5 ± 2
Forma	-	-	-	~	~
Energía Disipada	$E_{disipada}$	[J]	Máxima	58.6	54.9
Energía Devuelta	$E_{devuelta}$	[J]	Mínima	~ 1.5	~ 0.5
Eficiencia del Atenuador	$\eta$	[-]	Máxima	0.97	0.99
Distancia de Desaceleración	$d$	[mm]	$d \geq 80 \text{ mm}$	19 ± 1.5	111 ± 9
Deformación	$\varepsilon_{max}$	[%]	< 70 %	≈ 20	≈ 57
Fuerza Media de Pico de Impacto	$P_{i,pico}$	[N]	-	2250 ± 0	544 ± 73
Fuerza Crítica de Impacto	$P_{i,crit}$	[N]	-	1996 ± 254	454 ± 73
Efectos Erosivos	-	-	-	Ninguno	Ninguno
Masa del Disipador	$m_{disipador}$	[Kg]	Mínimo	0.048 ± 0.001	0.028 ± 0.001
Densidad del Disipador	$\bar{\rho}$	[Kg/m <sup>3</sup> ]	-	53 ± 1.6	10.5 ± 0.6

Cuadro 35: Resumen de Resultados: Honeycomb hexagonal de papel.

## 10. Comparación de las Respuestas a Impacto de las Diferentes Alternativas Evaluadas

Finalmente, la figura que se presenta a continuación ofrece una única gráfica en la que se superponen todas las respuestas medidas, a fin de poder compararlas.

Nótese que, si bien la espuma plástica puede producir niveles de Factores de Desaceleración al Impacto reducidos, este material es candidato a producir el vuelco de la carga transportada como consecuencia de los potenciales rebotes a los que puede dar lugar.

El honeycomb por su parte, resulta significativamente más eficiente en cuanto a la disipación de energía haciendo improbable un rebote y posterior vuelco de la carga y además permite controlar los niveles para los Factores de Desaceleración desde el ajuste del tamaño de las celdas, del espesor y/o del tipo de papel.

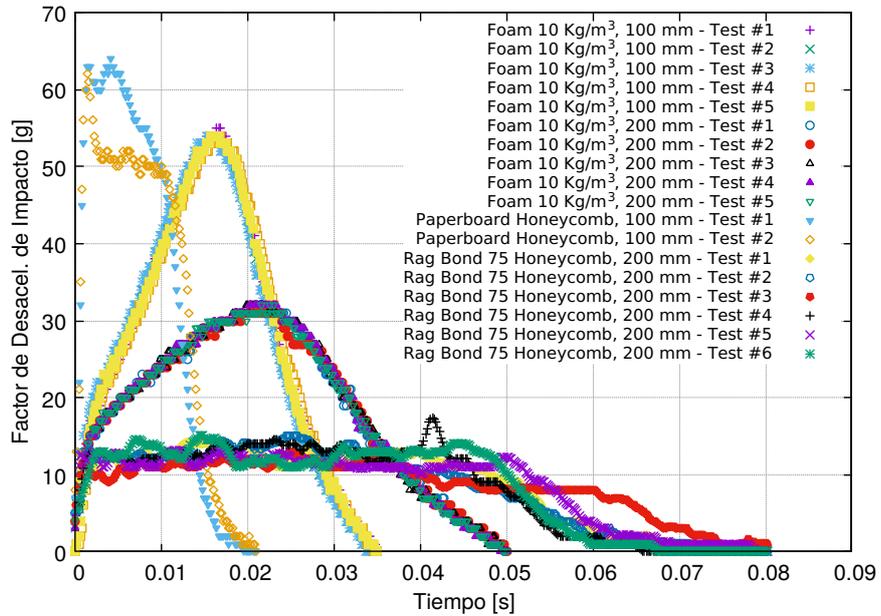


Figura 9: Comparación de las historias del Factor de Desaceleración en el Impacto en función del tiempo para los diferentes especímenes ensayados, cuando son sometidos al impacto de una masa de 3.7 Kg con una velocidad aproximada de 5.5 m/s.

## Parte IV

# Calculadora para Pre-dimensionamiento de Atenuadores de Impacto Colapsables

## 11. Descripción General

Lo que aquí se denomina 'calculadora' para el pre-dimensionamiento de los atenuadores de impacto consiste en una aplicación para PC, que proporciona las dimensiones del atenuador de impacto colapsable a colocar en el packaging de la carga, según sea el tipo de material/estructura colapsable seleccionado/a y las condiciones de impacto en el aterrizaje previstas para la carga.

El código está escrito en lenguaje FORTRAN y considera el empleo de: (i) espumas poliméricas de densidades entre 5 y 30 Kg/m<sup>3</sup>, o de cualquier otro material cuyo modelo cinemático sea el mismo, para el que se conozcan los parámetros A0, A1, A2, A3 y A4, y (ii) estructuras colapsables formadas por celdas de paredes delgadas de forma hexagonal, con opción de seleccionar diferentes tipos de papel tales como Rag Bond 75, Paper Offset o cualquier otro material del que se disponga de propiedades físicas/mecánicas tales como la densidad, el módulo de elasticidad y la tensión de fluencia en compresión y, por supuesto, su espesor de pared. En cuales quiera de los casos el código es perfectamente ampliable y perfectible, de acuerdo a las necesidades que oportunamente surjan.

## 12. Tratamiento de las Espumas Poliméricas

Tal como se describe más arriba para las espumas, a los fines de cálculo y análisis, desde un enfoque macroscópico es posible construir modelos constitutivos aproximados, considerando que se trata de un material pseudo-isotrópico, continuo, con una relación constitutiva no lineal.

Así, por simplicidad se adopta un Modelo Uniaxial Fenomenológico, de la forma:

$$\sigma = A_0 + A_1\varepsilon + A_2\varepsilon^2 + A_3\varepsilon^3 + A_4\varepsilon^4$$

Donde los coeficientes  $A_i$ , basados en la información presentada en el documento Ref.: [4], se han descrito en función de la densidad de la espuma, de la forma:  $A_i = k_i\rho$ .

Símbolo	Valor	Unidad
$k_0$	0.677144	$\left[\frac{MPa}{Kg/m^3}\right]$
$k_1$	109.242310	$\left[\frac{MPa}{Kg/m^3}\right]$
$k_2$	-433.013650	$\left[\frac{MPa}{Kg/m^3}\right]$
$k_3$	733.228850	$\left[\frac{MPa}{Kg/m^3}\right]$
$k_4$	-398.349040	$\left[\frac{MPa}{Kg/m^3}\right]$

Cuadro 36: Coeficientes para la ecuación constitutiva de las Espumas de Poliestireno como función de la densidad. (Ref.: [4])

Por otro lado, la deformación específica unitaria  $\varepsilon$  se estima asumiendo que su distribución es uniforme en el espesor del atenuador y que puede ser calculada como:

$$\varepsilon = \frac{u}{t_{aten}}$$

La estimación de las dimensiones del atenuador se inicia calculando el espesor del mismo como:

$$s = \frac{V_v^2}{2g(n\eta - 1)}$$

$$t_{aten} \geq \frac{s}{0,70} = \frac{1}{0,70} \frac{V_v^2}{2g(n\eta - 1)}$$

Nota: Se utiliza una eficiencia  $\eta = 0.5$ .

Luego se integra la ecuación de movimiento:  $m\ddot{u} = mg - \sigma\left(\frac{u}{t_{aten}}\right)A$ , para diferentes áreas de impacto  $A$  y con condiciones iniciales  $u = 0$  y  $\dot{u} = V_{impacto}$ .

El programa extrae aquel conjunto de dimensiones del atenuador que satisface, dentro de ciertos márgenes, los factores de desaceleración máximos permisibles y los porcentajes de contracción aceptables.

### 13. Tratamiento de las Estructuras de Celdas Colapsables

Para el caso de las estructuras de celdas colapsables, se emplea el concepto de tensión de colapso (crippling/crushing) en la dirección longitudinal de las celdas hexagonales. La tensión de falla local de las paredes de las mismas, asumiendo que se trata de una sección con múltiples esquinas (Método de Gerard (Ref.: [2])), se puede estimar como:

$$F_{cc} \approx \begin{cases} 0,56F_{cy} \left(\frac{\bar{\rho}}{\rho}\right) \left(\frac{g\bar{t}^2}{A} \sqrt{\frac{E_c}{F_{cy}}}\right)^{0,85}, & \text{si } 0,56 \left(\frac{g\bar{t}^2}{A} \sqrt{\frac{E_c}{F_{cy}}}\right)^{0,85} \leq 0,80 \\ 0,80F_{cy} \left(\frac{\bar{\rho}}{\rho}\right), & \text{si } 0,56 \left(\frac{g\bar{t}^2}{A} \sqrt{\frac{E_c}{F_{cy}}}\right)^{0,85} > 0,80 \end{cases}$$

Asumiendo que la estructura del atenuador emplea celdas hexagonales, como ya se ha mencionado, tal configuración puede interpretarse como formada por un patrón repetido de perfiles 'Y' conectados entre sí. Esta conexión supone que los extremos de las aletas de la 'Y' se encuentran, como mínimo, simplemente apoyados, de modo que para el empleo de las ecuaciones de Gerard, se considera:  $g = 3$  cortes + 6 aletas = 9,  $A = 2t(b+h)$  y  $\bar{t} = t\frac{b+h}{b+\frac{h}{2}}$ .

Las dimensiones de las celdas del honeycomb son proporcionadas como un dato de entrada y, de manera similar a lo que se hace con las espumas, la estimación de las dimensiones del atenuador se inicia calculando el espesor del mismo como:

$$s = \frac{V_v^2}{2g(n\eta - 1)}$$

$$t_{aten} \geq \frac{s}{0,70} = \frac{1}{0,70} \frac{V_v^2}{2g(n\eta - 1)}$$

Nota: Para este caso se utiliza una eficiencia mayor  $\eta = 0.8$ .

De la ecuación de movimiento es posible despejar la fuerza en el impacto:  $P_{imp} = m\left(\frac{V_{imp}^2}{2s} + g\right)$ , que puede ser calculada simultáneamente como:  $P_{imp} = F_{cc}A$ .

De igualar ambas expresiones<sup>7</sup>, el área de impacto  $A$  del atenuador, resulta:

$$A = \frac{m}{F_{cc}} \left(\frac{V_{imp}^2}{2s} + g\right)$$

<sup>7</sup>Asumiendo que la tensión y la carga de crippling son aproximadamente constantes a medida que el atenuador se colapsa.

## Parte V

# Comentarios Finales

## 14. Observaciones Técnicas Generales

Si bien el dispositivo atenuador de impacto debe trabajar en forma omnidireccional, ya que no resulta posible regular la posición de la carga en el momento del impacto, se establece como condición de diseño que la energía cinética horizontal debe ser disipada por el deslizamiento de la carga sobre el suelo, mientras que la energía cinética vertical debe ser disipada por el dispositivo atenuador de impacto.

Para las condiciones del suelo en el punto de aterrizaje, se asume que este es 100 % rígido.

El estudio muestra que, tomando como base la distancia de frenado de la carga para conseguir factores de desaceleración entre 10 g y 35 g, con velocidades de descenso en el orden de 5 m/s, la solución tecnológica más adecuada para el atenuador de impacto consiste en el empleo de materiales y/o estructuras de tipo colapsables.

Toda la energía cinética de la carga debe ser absorbida/disipada en el impacto, dentro del 70 % de deformación específica unitaria del atenuador.

La energía devuelta debe ser minimizada a los fines de evitar potenciales rebotes/vuelcos de la carga.

Si bien puede resultar una obviedad, la disponibilidad y el costo del atenuador seleccionado se vuelven factores muy importantes en lo que se refiere al lanzamiento de cargas. Tan es así que, en este tipo de operaciones y dentro de ciertos límites, es posible priorizar el costo frente a la confiabilidad del sistema.)

Los atenuadores de impacto colapsables no son reutilizables.

Excepto para honeycomb metálicos, todos los absorbedores de energía estudiados resultan transparentes a las señales de radio.

En cuanto al almacenamiento, el volumen ocupado por las estructuras del tipo honeycomb pueden ser significativamente menores que aquel ocupado por los bloques de espuma. (Los primeros pueden almacenarse comprimidos y ser extendidos previo a la operación.)

Los atenuadores de espuma polimérica presentan mayor disponibilidad, en el mercado local, que los atenuadores colapsables del tipo honeycomb.

## 15. Comentarios sobre los Resultados de Simulación

### 15.1. Atenuadores Construidos a partir de Espumas Poliméricas

Los atenuadores de impacto estudiados, construidos a partir de espumas poliméricas, ofrecen tiempos de impacto breves y muestran distancias de frenado reducidas frente al espesor del atenuador ( $\varepsilon_{max} \ll 1$ ). Conforme con los resultados obtenidos, cuanto más baja es la densidad de las espumas, mejor es la respuesta. Adicionalmente, los niveles de aceleración máximos, resultan muy elevados en comparación con los valores requeridos, además de exhibir valores de 'pico' comparativamente grandes, en relación con la aceleración media de impacto.

Los atenuadores de espuma estudiados muestran eficiencias en el orden del 80 %, devolviendo aproximadamente el 20 % de la energía absorbida pudiendo ocasionar rebotes y/o vuelcos de la carga.

En este sentido, cabe destacar que, si bien las aceleraciones se reducen a medida que se incrementa el espesor del atenuador, la eficiencia energética del impacto también se reduce, devolviendo mayor cantidad de energía y pudiendo provocar rebotes no deseados.

Los atenuadores de espuma estudiados muestran fuerte correlación entre las respuestas estática y dinámica, permitiendo establecer relaciones que conduzcan a reglas prácticas para el dimensionamiento de los atenuadores en función del tipo de carga, sin necesidad de recurrir a costosos estudios de la respuesta dinámica del mismo.

Se fija como criterio una deformación máxima del 70% y una mínima del 50%, a los fines de diseño del atenuador.

Los niveles de  $g$  requeridos resultan exigentes por lo bajos. Es normal que en impactos no muy fuertes las aceleraciones rondan los 100 a 200  $g$ .

Dados los elevados niveles de factores de desaceleración que se producen, aún para tensiones estáticas altas y para deformaciones considerables ( $\sim 40\%$ ), la espuma polimérica BASF 2500 no es un candidato a material colapsable elegible. Espesores grandes podrían resultar de utilidad ( $\sim 450$  mm), pero esto tiene en contra el volumen y el costo del disipador.

La espuma RMAX Isolite de  $20 \frac{Kg}{m^3}$  también presenta elevados niveles de factores de desaceleración, pero ofrece una respuesta potencialmente útil a partir de los 250 mm de espesor.

Espumas de baja densidad como la RMAX Isolite de  $13 \frac{Kg}{m^3}$ , si bien producen bajos niveles de factor de desaceleración de impacto, también resultan poco flexibles en cuanto al rango de amplitudes de tensiones estáticas (base de la curva  $n$  vs.  $\sigma_{est}$  'poco plana').

A menos que se utilicen espesores grandes ( $\sim 450$  mm), resulta necesario necesario calibrar el atenuador para que trabaje con valores de tensión estática comprendidos en el rango: 3 a 5 KPa.

## 15.2. Atenuadores de Celdas Colapsables, Construidos a partir de Láminas de Papel

Para las estructuras de celdas colapsables, si la tensión estática resulta lo suficientemente elevada, el cambio en el espesor del atenuador no muestra variaciones significativas sobre el factor de desaceleración  $n$ ; la fuerza de frenado es aproximadamente constante, e igual a la carga crippling de la estructura.

Esta carga crítica de crippling puede ser modificada variando la arquitectura y las dimensiones de las celdas del atenuador.

Las curvas de la figura 4 pueden ser utilizadas como herramientas de dimensionamiento de los atenuadores, siempre que la velocidad de impacto sea de 5 m/s. Claro está que la predicción se limita a la tecnología, formas y dimensiones allí señaladas.

## 16. Comentarios sobre los Resultados de Ensayo

### 16.1. Atenuadores Construidos a partir de Espumas Poliméricas

Si bien las espumas poliméricas pueden producir niveles de Factores de Desaceleración al Impacto reducidos, los ensayos muestran claramente que el empleo de este tipo de materiales puede conducir al vuelco de la carga transportada, como consecuencia de los potenciales rebotes a los que puede dar lugar, dado que su eficiencia en disipación es reducida y que por lo tanto devuelve una gran cantidad de la energía de impacto.

Espumas poliméricas de baja densidad, sí se encuentran disponibles en el mercado local, especialmente el foam de poliestireno conocido comunmente como 'telgopor'.

### 16.2. Atenuadores de Celdas Colapsables, Construidos a partir de Láminas de Papel

El honeycomb por su parte, resulta significativamente más eficiente que el foam en cuanto a la disipación de energía, haciendo improbable un rebote y posterior vuelco de la carga.

Además permite controlar los niveles para los Factores de Desaceleración desde el ajuste del tamaño de las celdas, del espesor del papel y/o del tipo de éste.

Estructuras colapsables de papel, no se encuentran casi disponibles en el mercado local.

Las estimaciones realizadas vía simulación numérica, sobre-estiman la eficiencia de las espumas poliméricas.

## 17. Comentarios sobre la Calculadora para el Pre-dimensionamiento de los Atenuadores de Impacto

A modo de validación preliminar, desde una comparación con los ensayos de impacto realizados, se encuentra que, de ingresar los parámetros de los materiales y aquellos asociados a las condiciones de impacto de la carga, la calculadora devuelve dimensiones para los atenuadores muy similares a las de los especímenes correspondientes. Un estudio más detallado se encuentra fuera del alcance de este trabajo.

## Referencias

- [1] ANSYS Inc. *ANSYS User Guide - ANSYS Help R14.0*, 2011.
- [2] E. F. Bruhn. *Analysis and Design of Flight Vehicle Structures*. Jacobs Publishing, Inc., 1973.
- [3] D. Caufield and D. Gunderson. Paper testing and strength characteristics. Technical report, USDA Forest Services - Forest Products Laboratory, 1988.
- [4] RMAX Rigid Cellular Plastics Huntsman Chemical Company. Rmax isolite expanded polystyrene - technical data.
- [5] Department of Defense, United States of America. *Package Cushioning Design (MIL-HDBK-304C)*, 1997.
- [6] Headquarters, Department of the Army. *MC-4 Ram Air Free-Fall Personnel Parachute System - Technical Manual*, 2003.
- [7] T. W. Knacke. *Parachute Recovery Systems - Design Manual*. Para Publishing, 1992.
- [8] W. Szewczyk. Determination of poisson's ratio in the plane of the paper, 2008.
- [9] Shen R. Wu and Lei Gu. *Introduction to the Explicit Finite Element Method for Nonlinear Transient Dynamics*. Wiley, 2012.
- [10] www.matweb.com. Basf styrodur 2500 c extruded rigid polystyrene foam (europe), 2017.