



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de
Caminos, Canales y Puertos.*

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO DE PAVIMENTOS ESPECIALES DE ALTA CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE IMPACTOS EN ÁREAS

Trabajo realizado por:

Antonio Aguado Santiago

Dirigido::

Rubén Diego Carrera

David Santos Gómez

Titulación:

**Máster Universitario en
Ingeniería de Caminos, Canales y
Puertos**

Santander, Junio de 2017

TRABAJO FINAL DE MASTER

RESUMEN

Título del TFM: “ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO DE PAVIMENTOS ESPECIALES DE ALTA CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE IMPACTOS EN ÁREAS INFANTILES.”

Autor: Antonio Aguado Santiago.

Directores: Rubén Diego Carrera y David Santos Gómez.

Convocatoria: Junio de 2017

Palabras clave: Parques Infantiles, seguridad, pavimentos de seguridad, amortiguación, impactos, caucho continuo, SBR, EPDM, HIC, altura de caída crítica, rigidez, análisis económico, coste de ejecución, coste de mantenimiento, rentabilidad socioeconómica, economía de escala.

Resumen

Las personas durante la infancia adquieren gran parte de las capacidades que necesitan para el resto de su vida. Jugar ayuda al crecimiento integral del niño, de manera que mediante el juego se puede estimular el desarrollo intelectual, físico, emocional, y social de los más pequeños. Por esta razón, en la sociedad contemporánea, las áreas de juego infantil se convierten en espacios imprescindibles para el progreso de las habilidades de los infantes, siendo un lugar de juego y de encuentro con otros niños de diferentes rangos de edad.

Actualmente se considera a los más pequeños un colectivo muy sensible, y que debe de tener una especial protección. Por esta razón, las autoridades europeas han redactado una normativa (EN 1176 y EN 177) que estandariza los criterios de seguridad mínimos para las diferentes partes que forma un área de juego, principalmente los elementos de juego y el pavimento. Esto queda reflejado en la evolución de los parques infantiles, siendo los parques más modernos diseñados en base a esos criterios, convirtiéndose en lugares mucho más seguros.

Que los niños jueguen en los parques infantiles implica una serie de riesgos de accidente, tales como atrapamientos, cortes o caídas. Con la aplicación de la normativa se pretende evitar los peligros y reducir los efectos en caso de accidente.

Los accidentes que producen las lesiones más graves en los usuarios, son las caídas desde los elementos de juego al suelo en las que se impacta con la cabeza. Para disminuir las consecuencias de las posibles caídas, se indica para que casos es necesario instalar un pavimento con capacidad absorbidora de impactos.

Se establece un criterio de medida objetivo de la amortiguación de los pavimentos. Se trata del ensayo de determinación de la altura de caída crítica, que se basa en el cálculo del HIC (Criterio de Lesión en la Cabeza) para impactos desde diferentes alturas, estableciendo la altura de caída crítica aquella con un valor 1000 de HIC, que se corresponde con la probabilidad de sufrir una lesión grave en la cabeza de un 3%.

En base a esto, se establece que un pavimento se considera seguro cuando la altura crítica de caída sea superior a la altura libre de caída de un determinado elemento de juego en el área de impacto requerido.

En el mercado existen muchos tipos de superficies que se pueden emplear como pavimentos de seguridad. Uno de los más extendidos y que más ventajas presenta es el caucho continuo.

En el trabajo se ha realizado una parte experimental que ha consistido en la fabricación de muestras de caucho continuo bicapas, compuestas por una capa superficial de caucho Etileno-Propileno-Dieno (EPDM) y resina al 18% del peso, y otra de caucho Estireno-Butadieno (SBR) reciclado procedente de la valorización de neumáticos fuera de uso y resina al 15% (la cantidad de resina empleada en ambas capas no ha sido una variable que se haya modificado en las diferentes muestras).

Estas probetas se han sometido a ensayos de determinación de la altura de caída crítica (tres veces por muestra), y en adicción, a ensayos de rigidez, ya que existe una hipótesis inicial de que el amortiguamiento y la rigidez deben de estar relacionados.

Para llevar a cabo los ensayos, se ha dividido el proceso en dos fases que están bien diferenciadas:

- Fase 1:

En la primera fase se han confeccionado ocho muestras del mismo espesor (40 mm) de caucho continuo. Todas las probetas están formadas por una capa superficial de 10 mm de una mezcla de EPDM de color verde y resina. La diferencia entre las muestras se encuentra en la capa base de 30 mm de espesor, formada por SBR reciclado y resina. Se disponen de tres granulometrías (0.5-2.5, 1-4 y 2-7 mm) que se han combinado de diferente forma para obtener las 8 muestras. En un caso se ha añadido paja y en otro, ahorros en el material.

- Fase 2

Una vez finalizada la parte experimental de la fase 1, se decide fabricar nuevas probetas que ensayar de los tres tipos de muestras que obtienen mejores resultados de altura de caída crítica (las muestras formadas por una única granulometría), manteniendo las mismas características a excepción del espesor de la capa base de SBR. Se fabrican prototipos de pavimento de caucho continuo con espesores de 60, 80 y 100 mm para cada tipología de muestra escogido.

Una vez realizados los ensayos, se procede al estudio de los datos obtenidos para realizar un primer análisis técnico, y posteriormente en base al cálculo estimado del coste de cada muestra, un análisis económico de los costes en relación con la amortiguación del pavimento de seguridad.

De este análisis se recogen algunas de las conclusiones obtenidas:

- Un incremento del espesor provoca un aumento de las propiedades absorbedoras de impactos, es decir, creciendo la altura de caída crítica.

- Un incremento del espesor produce una reducción de los módulos de rigidez.
- La rigidez se estabiliza para el último incremento de espesor ensayado para las muestras A y B, por lo que existe un punto en el que el espesor deja de tener influencia en la rigidez de los pavimentos
- Existe una relación entre el ensayo de rigidez y el de amortiguamiento, pero está limitado a un cierto rango de espesores, ya que, a partir de 80 mm, los resultados de rigidez no varían prácticamente mientras que si se producen incrementos de amortiguamiento.
- Por estas razones, el ensayo de determinación de la altura de caída crítica es más sensible que el de rigidez en cuanto a la medición del amortiguamiento.
- La muestra F es de tipo loseta prefabricada de caucho. Presenta ahorros de material en la capa base que generan espacios huecos bajo la loseta. Al analizar los datos de amortiguación se detectó una gran variación entre las alturas de caída obtenidas, adoptándose como hipótesis explicativa que en este tipo de pavimentos existe diferencia entre impactar contra una zona maciza que contra zona de menor espesor y con aire debajo, obteniendo mejores resultados de amortiguamiento en el último caso.
- En muestras de 40 mm, el EPDM utilizado en la capa superficial supone un 60% del coste total, por lo que se entiende la concepción del caucho continuo de forma bicapa, tratando de minimizar el uso del caucho de color para el acabado.
- El incremento de coste al aumentar el espesor mediante el recrecido de la capa base de SBR y resina, repercute en un 65% sobre la resina. En las muestras de 100 mm de espesor, el coste total de la resina llega a ser prácticamente el 50% del pavimento. Por esta razón es clave fabricar pavimentos con dosificaciones de resinas adecuadas que no disparen los costes del material, manteniendo siempre la cohesión, homogeneidad y propiedades amortiguadoras de las capas de caucho que ligan.
- Los pavimentos ensayados presentan un rendimiento de economía de escala decreciente. En términos globales, para aumentar el amortiguamiento de un pavimento de caucho continuo es necesario incrementar costes en material en una mayor proporción.
- De la serie de muestras ensayadas, la muestra del tipo C presenta la peor relación coste-amortiguamiento, por lo que según estos dos criterios es la peor alternativa.
- La muestra del tipo presenta A el mejor comportamiento técnico y económico hasta una altura de caída crítica aproximadamente de 1.80 m. A partir de alturas de caída crítica superiores a la indicada, la alternativa B sería la que guarda mejor relación coste-amortiguación. Por lo tanto, la elección de un tipo de pavimento u otro dependerá de la altura libre del elemento de juego para el cual se va a instalar el pavimento de seguridad, escogiendo pavimentos de caucho continuo del tipo A para el primer rango de valores, y los del tipo B para las alturas de caída superiores a 1.80 m.

SUMMARY

Title: “TECHNICAL AND ECONOMICAL ANALYSIS OF SPECIAL PLAYGROUND PAVEMENTS WITH HIGH-CAPACITY ABSORPTION OF IMPACTS.”

Author: Antonio Aguado Santiago.

Directors: Rubén Diego Carrera y David Santos Gómez.

Date: June 2017

Key words: Playground, safety, safety pavements, damping, impacts, continuous rubber, SBR, EPDM, HIC, critical fall height, stiffness, economic analysis

Summary

During childhood, people acquire a great deal of the capacities they need for the rest of their life. Playing helps with the integral growth of the child so that the little ones can develop intellectually, physically and emotionally through the play. For this reason, in contemporary society, children's play areas have become indispensable spaces for the progress of the children's abilities, being a place of play and meeting with other children of different age ranges.

Currently, children are considered a very sensitive group that must have a special protection. For this reason, the European authorities have drafted a regulation (EN 1176 and EN 177) that standardizes the minimum safety criteria for the different parts that form a play area, mainly the play elements and the pavement. This is reflected in the evolution of playgrounds, as the most modern parks are being designed based on these criteria, becoming much safer places.

Having children playing in playgrounds involves a range of risks of accident, such as entrapments, cuts or falls. The application of the regulations is intended to avoid hazards and reduce the effects in case of an accident.

The accidents that produce the most serious injuries in the users, are the falls from the elements of game to the ground there is an impact in the head. To reduce the consequences of possible falls, it is indicated for which cases it is necessary to install a pavement with the capacity of absorbing impacts.

An objective measure of the damping of the pavements is established then. This is the critical fall height test, which is based on the calculation of the HIC (Head Injury Criterion) for impacts from different heights, establishing the critical fall height with a value of 1000 HIC, which corresponds to a probability of suffering a severe head injury of 3%.

Based on this, it is established that a pavement is considered safe when the critical fall height is greater than the free fall height of a given game element in the required impact area.

There are many types of surfaces on the market that can be used as security pavement. One of the most spread and advantageous is the continuous rubber.

It's been carried out an experimental part that has consisted in the manufacture of samples of two layers of continuous rubber, composed of a surface layer of ethylene-propylene-diene rubber (EPDM) and resin at 18% of the weight, and another rubber styrene -Butadiene (SBR) recycled from the recovery of unused tires and 15% resin (the amount of resin used in both layers has not been a variable that has been modified in the different samples).

These specimens have been subjected to tests of critical fall height (three times per sample), and to rigidity tests, since there is an initial hypothesis that damping and stiffness must be related.

To carry out the tests, the process has been divided into two phases:

- Phase 1

In the first phase eight samples of the same thickness (40 mm) of continuous rubber were made. All specimens are made up of a 10 mm surface layer of a mixture of green EPDM and resin. The difference between the samples is found in the base layer 30 mm thick, consisting of recycled SBR and resin. There are three particle sizes (0.5-2.5, 1-4 and 2-7 mm) that have been combined in different ways to obtain the 8 samples. In one case, straw was added and in another, savings in the material.

- Phase 2

Once the experimental part of phase 1 is finished, it is decided to produce new specimens of the three types of samples that have obtained the best critical fall height results (the samples formed by a single granulometry), maintaining the same characteristics with the exception of the thickness of the base layer of SBR. Continuous rubber pavement prototypes with thicknesses of 60, 80 and 100 mm are manufactured for each type of sample chosen.

Once the tests have been carried out, the data obtained can be studied for a first technical analysis, and then, based on the estimated cost of each sample, an economic analysis of the costs in relation to the damping of the safety pavement is carried out.

These are some of the conclusions obtained from the analysis:

- An increase of the thickness causes an increase of the capacity of absorbing impacts, i.e., increasing the height of critical fall.
- - An increase in the thickness results in a reduction of the stiffness modules.
- - Stiffness is stabilized for the last increase in thickness tested for samples A and B, so that there is a point where thickness no longer influences the stiffness of the pavement
- - There is a relationship between the stiffness test and the damping test, but it is limited to a certain range of thicknesses, since, from 80 mm, the stiffness results do not vary whereas it does result in damping increase
- - For these reasons, the critical drop height determination test is more sensitive than the damping measurement stiffness test.

- - Sample F is made of a prefabricated rubber tile. It has savings of material in the base layer that generate hollow spaces under the tile. When analyzing the damping data, a great variation was detected between the obtained heights of fall, adopting as explanatory hypothesis that in this type of pavements there is a difference between an impact against a solid zone and against a zone with smaller thickness and air below, obtaining better results of damping in the latter case.
- - In 40 mm samples, the EPDM used in the surface layer accounts for 60% of the total cost, which means that the design of continuous rubber with two layers, trying to minimize the use of colored rubber for the finish.
- - The increase in cost by increasing the thickness by raising the base layer of SBR and resin, has a 65% impact on the resin. In samples of 100 mm thickness, the total cost of the resin becomes practically 50% of the pavement. For this reason, it is crucial to fabricate pavements with suitable resin dosages that do not highly increase the costs of the material, always maintaining the cohesion, homogeneity and damping properties of the rubber layers that bind.
- - The pavements tested have a decreasing performance at scale. In overall terms, to increase the damping of a continuous rubber pavement it is necessary to increase material costs in a greater proportion.
- - Of the series of samples tested, type C presents the worst cost-damping relation, reason why according to these two criteria is the worse alternative.
- - The type A sample shows the best technical and economic performance up to a critical fall height of approximately 1.80 m. From critical fall heights above that indicated, alternative B would be the one with the best cost-damping relation. Therefore, the choice of one type of pavement or another depends on the free height of the play element for which the safety pavement is installed, choosing continuous rubber pavements of type A for the first range of values, and Type B for heights of fall greater than 1.80 m.

ANÁLISIS TÉCNICO - ECONÓMICO DE PAVIMENTOS ESPECIALES DE ALTA CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE IMPACTOS EN ÁREAS INFANTILES

Alumno: Antonio Aguado Santiago

Directores: Rubén Diego Carrera

David Santos Gómez

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	12
2	ENCUADRE REFERENCIAL	14
3	OBJETIVOS.....	16
3.1	OBJETIVOS GENERALES	16
3.2	ESPECÍFICOS.....	16
3.3	SOCIALES.....	16
4	ESTADO DEL ARTE	17
4.1	ÁREAS DE JUEGO INFANTIL.....	17
4.1.1	LA IMPORTANCIA DEL JUEGO.....	17
4.1.2	DESARROLLO DE LAS ÁREAS DE JUEGO INFANTIL	20
4.2	MATERIALES	23
4.2.1	CONDICIONES DE LOS PAVIMENTOS SEGÚN LA NORMATIVA EUROPEA VIGENTE.....	23
4.2.2	MATERIALES EMPLEADOS EN ÁREAS DE JUEGO INFANTIL..	26
4.2.3	CAUCHO	37
4.2.4	RESINA POLIMÉRICA.....	46
4.3	ENSAYOS.....	48
4.3.1	DETERMINACIÓN DE LA ALTURA DE CAÍDA CRÍTICA	48
4.3.2	MÓDULOS DE RIGIDEZ	52
5	METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN.....	55
5.1	ENSAYOS.....	55
5.1.1	Determinación de la altura de caída crítica.	55
5.1.2	ENSAYO DE RIGIDEZ ESTÁTICA, C_{EST}	64
5.1.3	ENSAYO DE RIGIDEZ DINÁMICA, C_{DIN}	68
5.2	MUESTRAS.....	71
5.2.1	FASE 1	71
5.2.2	FASE 2	81
5.3	SISTEMÁTICA OPERATIVA.....	87
5.3.1	FASE 1	87
5.3.2	FASE 2	87
6	RESULTADOS.....	89

6.1	ALTURA DE CAÍDA CRÍTICA.....	89
6.2	MÓDULO DE RIGIDEZ ESTÁTICA C_{EST}	89
6.3	MÓDULO DE RIGIDEZ DINÁMICA C_{din}	90
6.4	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS POR FASES.....	91
6.4.1	RESULTADOS FASE 1	91
6.4.2	RESULTADOS FASE 2	108
6.5	RESUMEN DE RESULTADOS	126
6.5.1	RESUMEN RESULTADOS FASE 1	126
6.5.2	RESUMEN RESULTADOS FASE 2.....	126
7	ANÁLISIS Y CONCLUSIONES TÉCNICAS	128
7.1	FASE 1	128
7.1.1	Altura de caída crítica	129
7.1.2	Ensayos de rigidez.....	133
7.2	FASE 2	137
7.2.1	Altura de caída crítica	138
7.2.2	Ensayos de rigidez.....	145
7.3	CONCLUSIONES TÉCNICAS.....	150
8	ANÁLISIS ECONÓMICO.....	152
8.1	ESTIMACIÓN DEL COSTE DEL MATERIAL DE CADA MUESTRA. 152	
8.1.1	DATOS DE PARTIDA	152
8.1.2	METODOLOGÍA ADOPTADA PARA LA ESTIMACIÓN DEL COSTE 154	
8.1.3	CÁLCULO DE COSTE ESTIMADO (€/m^2).....	158
8.2	ANÁLISIS DE COSTES	160
8.2.1	COSTES DESCOMPUESTOS POR MATERIALES. FASE 1.....	160
8.2.2	COSTES FIJOS Y VARIABLES. FASE 2.....	162
8.2.3	EVOLUCIÓN DEL COSTE EN FUNCIÓN DEL ESPESOR	164
8.2.4	COMPARATIVA DEL COSTE FRENTE A LA ALTURA DE CAÍDA CRÍTICA 165	
8.3	CONCLUSIONES ECONÓMICAS	170
9	Coclusiones Y LÍNEAS DE FUTURO	173
9.1	CONCLUSIONES	173
9.2	LÍNEAS DE FUTURO	176

10	REFERENCIAS	179
	ANEXO I – colaboradores	181
	SANPE INGENIERÍA, S.L.....	181
	LABORATORIO DE LA DIVISIÓN DE CIENCIA E INGENIERÍA DE LOS MATERIALES	181
	VULGALIA, S.L.....	181
11	ANEXO II – GALERÍA FOTOGRÁFICA	182
12	ÍNDICE DE FIGURAS, TABLAS E ILUSTRACIONES.	188
12.1	ÍNDICE DE FIGURAS.....	188
12.2	ÍNDICE DE TABLAS.....	192
12.3	ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	196

1 INTRODUCCIÓN

En los últimos tiempos existe una especial sensibilización en la seguridad en los parques infantiles. Los usuarios de estas áreas de juego son niños, un colectivo especialmente vulnerable a sufrir daños físicos. Por esta razón, las autoridades han elaborado una normativa a nivel europeo que trate de resolver y minimizar los riesgos en áreas de juego, exigiendo unos requisitos de seguridad estandarizados.

La preocupación por la seguridad, ha provocado un cambio en la forma de instalar parques infantiles, poco tienen que ver los parques que han tenido la oportunidad de disfrutar la generación de niños actual, con la que tuvieron dos o tres generaciones anteriores, siempre manteniéndose la esencia y el espíritu de estos espacios de juego.

Los principales cambios que se han producido con los parques infantiles, tienen que ver con la búsqueda de nuevos elementos de juego y pavimentos, que minimicen el número de accidentes y lesiones en caso de que se produzcan, es decir, más seguros.

En cuanto a los pavimentos, no es el elemento principal de los parques infantiles, ya que el atractivo se encuentra en los diferentes elementos con los que los niños pueden jugar. En cambio, si es el principal elemento de seguridad relativo a las caídas de los niños en los parques.

Por lo general, los accidentes en parques infantiles que producen las lesiones más graves en los usuarios, son las caídas desde los elementos de juego al suelo. Por este motivo, la mayoría de los parques infantiles tienen instalados pavimentos cuyo objetivo es reducir los efectos de las caídas en caso de producirse.

El amortiguamiento del pavimento del área de impacto debe de estar en concordancia con el elemento de juego instalado, siendo la altura desde la que podría producirse una caída el criterio para valorar un posible impacto, de manera que ese pavimento será seguro si sus características amortiguadoras de impactos son capaces de absorber golpes a una altura de caída superior sin provocar lesiones muy graves, irreversibles o incluso la muerte de un usuario.

Para conocer si un pavimento es seguro o no, en la normativa se establece un método de ensayo para cuantificar la amortiguación de forma objetiva, así como un criterio para la determinación de si un pavimento cumple con los requisitos de seguridad para cada caso.

Existen muchos tipos de pavimentos que se emplean como revestimiento en parques infantiles. Uno de los más extendidos es el caucho en sus diferentes modalidades.

El presente trabajo se centra en realizar un análisis de las propiedades amortiguadoras de impacto de diferentes alternativas de caucho continuo, y relacionarlas con los costes económicos asociados únicamente al material. A su vez,

se ha hecho un estudio de las propiedades de los materiales, tratando de relacionar las propiedades amortiguadoras de impacto con la rigidez del material.

2 ENCUADRE REFERENCIAL

Las superficies que recubren los parques infantiles tienen como objetivo evitar o reducir los efectos de las posibles caídas desde diferentes alturas sobre el suelo, tratando de minimizar las lesiones que pudieran ocasionarse en las diferentes partes del cuerpo de un niño.

Por lo tanto, la severidad de un impacto de un usuario contra el suelo depende directamente de la superficie sobre la que se produce el golpe, ya que el pavimento puede amortiguar la colisión y reducir sus efectos en mayor o menor medida.

Se ha desarrollado una amplia normativa a nivel europeo que marca los criterios de seguridad que debe cumplir un parque infantil instalado. Uno de los aspectos que trata es definir si el pavimento instalado en el área de juego cumple con los requisitos establecidos. La norma cuantifica el amortiguamiento mediante la definición de un método de ensayo para la determinación de la altura de caída crítica, basándose en el Criterio de Lesión en la Cabeza (HIC), ya que considera que las lesiones más graves en caso de impacto son las que afectan a la cabeza.

La normativa también indica los materiales de amortiguación de impactos que se utilizan habitualmente, así como los espesores que deben tener cada material y la altura crítica de caída para la que es adecuado dicho material.

A su vez, permite utilizar otros materiales con otras profundidades para una altura crítica de caída según el ensayo de HIC realizado conforme a la Norma EN 1177.

Definidas las normativas referentes a la seguridad en parques infantiles, una vez instalado un área de juego, la única manera de saber si cumple con los niveles de seguridad exigidos es realizar inspecciones conforme a la norma. Para ello nacen los organismos de inspección, que son independientes e imparciales, siendo las únicas entidades con la capacidad de certificar la instalación de las áreas de juego conforme a la normativa vigente.

El autor del presente trabajo, realizó prácticas curriculares como parte del plan de estudios de la titulación Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos en uno de estos organismos. Estas prácticas se desarrollaron en la empresa Sanpe Ingeniería, S.L., especializada en la inspección de áreas de juego infantil.

Entre las labores a desarrollar como organismo de inspección de parques infantiles, está la de comprobar si las superficies instaladas en los parques infantiles cumplen con los niveles de seguridad exigidos, para lo cual disponen de un equipo de ensayo que permite cuantificar el amortiguamiento de los pavimentos de seguridad.

En algunas ocasiones, este tipo de empresas colaboran con fabricantes de suelos de seguridad, de forma que permiten a estos controlar sus productos, y comprobar el funcionamiento de nuevos pavimentos, ya que disponen del equipo necesario acreditado por ENAC, lo que da más fiabilidad a los resultados obtenidos.

En este contexto, y ante el interés que este tema despertó en el autor del trabajo, se propone la realización del presente Trabajo Fin de Máster: ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO DE PAVIMENTOS ESPECIALES DE ALTA CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE IMPACTOS EN ÁREAS INFANTILES.

Para la realización de este trabajo se ha requerido de la colaboración de un fabricante (Vulgalia) de pavimentos de seguridad, que ha facilitado muestras de diferentes alternativas de caucho continuo para su estudio. El análisis técnico se ha realizado gracias a la disponibilidad del equipo de ensayo para la determinación de la altura de caída crítica, por parte de Sanpe Ingeniería, y de ensayos de rigidez estática y dinámica gracias a la colaboración del Laboratorio de la División de Ciencia e Ingeniería de los Materiales (LADICIM) de la Universidad de Cantabria.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVOS GENERALES

El objetivo general de este trabajo fin de máster es estudiar diferentes alternativas de pavimentos bicapa de caucho continuo, destinados a su uso como pavimentos especiales de alta capacidad de absorción de impactos en áreas infantiles, analizando cómo evolucionan las propiedades de amortiguación del pavimento de las diferentes alternativas, y analizar dicha evolución en función del coste asociado al material de cada alternativa.

3.2 ESPECÍFICOS

Los objetivos específicos que se buscan con la realización del trabajo son:

- Estudiar la influencia de diferentes parámetros como son la granulometría del material y el espesor en el comportamiento del pavimento.
- Caracterizar el comportamiento frente a amortiguación y rigidez de las muestras de pavimento empleadas mediante la realización de ensayos de determinación de la altura de caída crítica y ensayos de rigidez.
- Relacionar el parámetro que mide el amortiguamiento de un material según la normativa, con la rigidez de dicho material.
- Realizar un análisis económico de las diferentes alternativas de pavimentos utilizadas.

3.3 SOCIALES

Los parques infantiles, por lo general, son de carácter público, y se instalan en al aire libre para que los usuarios de un grupo de edad determinado puedan divertirse y entretenerse. Son espacios que ayudan a complementar el desarrollo de diferentes capacidades de los niños mediante el juego.

El tipo de pavimento estudiado en este trabajo tiene como objetivo reducir la probabilidad de lesión de este grupo de edad tan sensible en caso de sufrir una caída contra el suelo. Por lo que cualquier conclusión que dé pie a mejorar este tipo de pavimentos y pueda ayudar a optimizar los costes de este tipo de materiales sin que ello afecte a la seguridad del área de juego, tiene en el fondo un carácter social, ya que podría mantener o mejorar la seguridad de los parques infantiles a un menor coste, o permitir instalar una mayor superficie amortiguadora de impactos.

4 ESTADO DEL ARTE

4.1 ÁREAS DE JUEGO INFANTIL

En este apartado se pretende explicar el proceso que se ha seguido hasta llegar a la conclusión de que los parques infantiles son espacios fundamentales para el desarrollo de los niños.

4.1.1 LA IMPORTANCIA DEL JUEGO

El juego es una actividad natural al ser humano, de una gran importancia en su edad más temprana, es decir, en los niños, ya que es la forma más natural de aproximarse y entender el mundo que les rodea.

Según la Real Academia Española, el juego se define como la acción y efecto de jugar por entretenimiento, considerando jugar el hacer algo con alegría con el fin de entretenerse, divertirse o desarrollar determinadas capacidades.

Son numerosos los autores que han estudiado el tema aplicado a la infancia y al desarrollo de los niños. De esta forma algunos autores van más allá en la definición de juego; Una de las definiciones más completas fue enunciada por Johan Huizinga en su obra *Homo ludens* (1938), donde “...el juego, en su aspecto formal, es una acción libre ejecutada `como sí´ y `sentida como´ situada fuera de la vida corriente. Pero que, a pesar de todo, puede absorber por completo al jugador, sin que haya en ella ningún interés material ni se obtenga de ella provecho alguno, que se ejecuta dentro de un determinado tiempo y un determinado espacio, que se desarrolla en un orden sometido a reglas y que da origen a asociaciones que tienden a rodearse de misterio o a disfrazarse para destacarse del mundo habitual...”.

Cabe destacar que el psicólogo suizo Piaget entendía que “los juegos tienden a construir una amplia red de dispositivos que permiten al niño la asimilación de toda la realidad, incorporándola para revivirla, dominarla o compensarla”.

Las interpretaciones que se realizan consideran al juego como una recreación de la vida humana, donde jugando se puede hacer una transformación simbólica o imaginaria de la realidad en la que el niño escoge de forma libre la temática, el argumento, los resultados, etc., para tratar de interpretar, asimilar y adaptarse de una forma más sencilla a la realidad en la que vive. A través de la actividad lúdica el niño va experimentando y dando sentido a cada cosa que vive, escoge los aspectos de la realidad que le son válidos, entiende el esfuerzo que requiere elaborar, e interioriza todas estas vivencias. Algunas de las consecuencias del proceso educativo que se produce mediante el juego son la adopción de una posición crítica, la orientación personal ante los hechos, o la expresión de actitudes y opinión.

Para algunos autores el juego implica una serie de procesos que ayudan al crecimiento integral del niño. El juego tiene las siguientes funciones principales (Arango, et. al 2000: 10):

- Educativa: Mediante el juego se estimula el desarrollo intelectual de los más pequeños, ya que permite hacer juicios sobre su propio conocimiento

al solucionar problemas, de manera que aprende a estar atento a una actividad durante un determinado tiempo. También se desarrolla su creatividad, imaginación e inteligencia ante la curiosidad por descubrir el entorno y a sí mismo. Además, el niño aprende el sentimiento de realización y diferentes lecciones, que después se siente motivado a aplicar sus ideas en situaciones de la vida real.

- Física: Mediante el juego, el niño desarrolla diferentes habilidades motrices y aprende a controlar su cuerpo y coordinar sus movimientos e intenciones, además de desahogar su energía acumulada.
- Emocional: El niño es capaz de expresar emociones que en ocasiones no puede expresar con palabras. Utiliza su imaginación, simulando ser algo que no es en realidad. Jugar permite a un niño desarrollar una actividad sin tener responsabilidades totales o limitantes en sus acciones. Fomenta su personalidad e individualidad, ayudándole a adquirir confianza y un sentido de la independencia. Al jugar se le permite tomar sus propias decisiones y reglas sin que nadie se las imponga o le reprima.
- Social: Con el juego un niño se va haciendo consciente de su entorno cultural y de un ambiente que había sido ajeno a él durante los primeros años. Se considera como un ensayo ante experiencias venideras, ya que va entendiendo el funcionamiento de la sociedad y de las acciones de otros seres humanos. De esta forma, aprende a cooperar y compartir con otras personas, conociendo su ambiente, y aprende las reglas del juego limpio, a ganar y a perder.

El juego es algo inherente a los niños desde su nacimiento, y este va evolucionando a lo largo de los años según el niño crece ya que está en relación con los diferentes cambios de conducta que fijan la forma en que el juego se lleva a cabo.

Según la edad del niño, se pueden diferenciar en el juego distintos tipos de conductas principales y que definen el juego (Mack y Gilley 1980: 11-37, Arango, et.al 2000: 12-14):

- Conducta desocupada: El niño momentáneamente observa ciertos objetos y acciones cercanas a él sin participar de forma directa. Se da entre los dos y dos años y medio.
- Comportamiento de espectador: En este caso el niño observa cómo juegan los otros niños. Puede hablar con otros, pero en ningún caso se ofrece a participar. Este tipo de conducta es habitual entre los dos y dos años y medio.
- Juego solitario: El niño tan sólo juega con otros juguetes, pero no habla ni juega con los otros niños, aunque puede intervenir en la conversación. También se da entre los dos y dos años y medio.



- Juego paralelo: El niño escoge los mismos juguetes que el resto de niños que le rodean, pero no hace ningún intento de jugar con ellos. Esta forma de juego se suele dar a los tres años de edad.
- Juego asociativo: Es una forma libre de juego en grupo, siendo un intento inicial del juego colectivo. El niño tiene una mayor capacidad para socializar con otros niños y seguir ciertas órdenes y patrones que observa a su alrededor. Comienza a decidir sin necesitar que un adulto le indique qué es lo adecuado. Es una etapa en la que es capaz de interactuar con otros niños que ya conoce sin enfrentarse a ellos, de forma que el juego en solitario va disminuyendo. Este tipo de juego se da a partir de los tres años y medio o los cuatro años.
- Juego cooperativo: Se trata de una actividad colectiva organizada, en la que participan en grupo con un objetivo utilizando materiales. Este juego se inicia desde los cuatro a los cinco años y medio. Con esta edad, el juego tiene un objetivo concreto, y la actitud en los niños se va relacionando más a su personalidad y sexo. El niño comienza a actuar de forma más realista, consiguiendo desarrollar un mejor autocontrol y siendo capaz de hacer empezar nuevas relaciones sociales.
- Juego grupal: El niño comienza a asociarse y hacer amigos al encontrar en estas similitudes en gustos e intereses. Esta conducta se comienza a observar entre los cinco años y medio y los siete años. El niño es capaz de tomar actitudes más reales en relación al entorno exterior, por lo que los juegos son más organizados y tienen una mayor complejidad. El niño es curioso y trata de descubrirse a sí mismo y a su entorno. Es en este momento cuando se siente realizado, y lo que aprende trata de llevar a cabo sus ideas en la vida real.

En definitiva, las principales características del juego es que este es libre, produce placer, es innato y se identifica como una actividad propia de la infancia, tiene una finalidad intrínseca, organiza las acciones de una forma propia y específica, es una forma de interactuar con la realidad, es una vía de autoafirmación, favorece la socialización, están limitados en el tiempo y en el espacio, pero son inciertos, constituye un elemento sobremotivador.

Por lo que, según lo estudiado por los diferentes investigadores, el juego es algo inherente a la infancia de los niños, y es un instrumento indispensable en la educación y el desarrollo de estos. Una vez que el juego se presupone como una herramienta imprescindible, hay que resolver el dónde un niño puede desarrollar la actividad lúdica.

4.1.2 DESARROLLO DE LAS ÁREAS DE JUEGO INFANTIL

La importancia del jugar en los niños queda reflejada en la *Declaración de los derechos del niño* aprobada en 1959, donde en el *Principio VII* se expresa lo siguiente:

“El niño debe disfrutar plenamente de juegos y recreaciones, los cuales deberán estar orientados hacia los fines perseguidos por la educación; la sociedad y las autoridades públicas se esforzarán por promover el goce de este derecho”.

Por lo tanto, jugar es un derecho de los niños, y como tal hay que permitir que los infantes puedan disfrutar.

Pero esta idea no ha sido así siempre, de hecho, a lo largo de la historia ha ido evolucionando el concepto de infancia. El historiador francés Phillipe Ariès, en su publicación *L'Enfant et la vie familiale sous l'Ancien Régime*, defiende cómo ha evolucionado el concepto de infancia a lo largo del tiempo, que no existía en la Edad Media donde los niños eran tratados como pequeños adultos que debían actuar como tal. No es hasta el Siglo XV cuando se empieza a percibir la infancia como una etapa diferente en la vida humana, los niños adquieren valor por el hecho de ser niños

A raíz de la Revolución Industrial se produce un importante éxodo rural. Las nuevas industrias necesitan muchos trabajadores para poder funcionar, por lo que muchas personas se ven atraídas por esta oportunidad y abandonan su vida en el campo para trasladarse a las ciudades donde se ubican las fábricas. En estas ciudades se comienza a edificar para dar alojamiento a la nueva clase obrera, de forma que se crean los grandes núcleos urbanos.

Con el paso de los años las ciudades siguen creciendo y desarrollándose. Un gran porcentaje de la población vive en los núcleos urbanos, que constituyen su centro de trabajo y de descanso.

Los niños que nacen en estas familias crecen en un entorno muy distinto al de sus antepasados. Este colectivo tiene importantes riesgos al salir a la calle, no cuentan con un ambiente tan natural y seguro como en las zonas rurales.

El juego es un aspecto básico en la educación de los niños, por lo que es necesario disponer de espacios de juego seguros dentro de las ciudades, donde los más pequeños puedan desarrollar esta actividad sin los peligros inherentes a hacerlo en la calle. De esta manera comenzaron a surgir los primeros parques infantiles como lugar de encuentro para el juego.

En los inicios se trataba de instalaciones arcaicas situadas en cualquier espacio libre de edificaciones y donde lo más importante eran los elementos de juego que en algunos casos eran grandes estructuras que podían suponer un peligro para la integridad física de los infantes.

Dichos elementos de juego estaban constituidos por materiales cuya principal misión no era garantizar el juego seguro para los niños; por otra parte, no contaban con un buen mantenimiento por lo que quedaban a la merced de las condiciones

meteorológicas y de uso, lo cual conlleva un progresivo deterioro de los elementos que lo componen.

Por otra parte, la superficie sobre la que se asentaron estos parques no era considerado como un factor determinante, situándose por ejemplo sobre hormigón, cantos, etc. inadecuados para el amortiguamiento en caso de caída.

Los parques infantiles se trataban por tanto de espacios donde reinaba el divertimento de los niños, pero que por sus condiciones no ofrecían las condiciones de seguridad adecuadas para su uso, produciéndose con relativa frecuencia lesiones con diferente alcance, tales como cortes, atrapamientos, rozaduras o golpes en diferentes partes del cuerpo al sufrir caídas.

La evolución de la sociedad y su mayor preocupación por la seguridad y salud de un colectivo tan sensible como el de los niños provocó que cada vez se buscarán materiales más adecuados para fabricar los diferentes elementos de juego, de manera que estos no perdieran su atractivo pero que su utilización fuera más segura. Los juegos metálicos y con aspecto oxidado empezaron a dejar paso progresivamente a elementos contruidos en diferentes tipos de plástico muy resistentes y duraderos, sin aristas afiladas, que posteriormente para poder salir al mercado y ser instalados requieren de un certificado CE.

Todo este proceso evolutivo fue acompañado del desarrollo de una legislación que insta a instalar los parques infantiles de una forma estandarizada y cumpliendo unos requisitos específicos para cada caso que tratan de evitar la posibilidad de sufrir accidentes, y que en caso de que se produzcan, que el resultado sea de la mayor levedad posible, partiendo de la base de que es imposible conseguir un parque infantil en el que se pueda asegurar a ciencia cierta que nunca va a ocurrir un accidente.

En Europa tuvo como resultado el desarrollo en 1997, por parte de las autoridades, de la normativa EN 1176 y EN 1177, relativa al equipamiento de las áreas de juego y superficies. Estas normas estandarizan las reglas en torno a la instalación de parques infantiles para que cumplan con el nivel de seguridad exigido.

Estas normas tienen su última versión actualizada en el año 2008, habiéndose traducido a la versión española en 2009, quedando las correspondientes normas UNE cuya relación es la siguiente:

- UNE-EN 1176-1:2009 Equipamiento de las áreas de juego y superficies. Parte 1: Requisitos generales de seguridad y métodos de ensayo.
- UNE-EN 1176-2:2009 Equipamiento de las áreas de juego y superficies. Parte 2: Requisitos de seguridad y métodos de ensayo adicionales específicos para columpios.
- UNE-EN 1176-3:2009 Equipamiento de las áreas de juego y superficies. Parte 3: Requisitos de seguridad y métodos de ensayo adicionales específicos para toboganes.

- UNE-EN 1176-4:2009 Equipamiento de las áreas de juego y superficies. Parte 4: Requisitos de seguridad y métodos de ensayo adicionales específicos para tirolinas.
- UNE-EN 1176-5:2009 Equipamiento de las áreas de juego y superficies. Parte 5: Requisitos de seguridad y métodos de ensayo adicionales específicos para carruseles.
- UNE-EN 1176-6:2009 Equipamiento de las áreas de juego y superficies. Parte 6: Requisitos de seguridad y métodos de ensayo adicionales específicos para balancines.
- UNE-EN 1176-7:2009 Equipamiento de las áreas de juego y superficies. Parte 7: Guía para la instalación, inspección, mantenimiento y utilización.
- UNE-EN 1176-10:2009 Equipamiento de las áreas de juego y superficies. Parte 10: Requisitos de seguridad y métodos de ensayo adicionales específicos para equipos de juego en recintos totalmente cerrados.
- UNE-EN 1176-11:2009 Equipamiento de las áreas de juego y superficies. Parte 11: Requisitos de seguridad y métodos de ensayo adicionales específicos para redes tridimensionales.
- UNE-EN 1177:2009 Revestimientos de las superficies de las áreas de juego absorbentes de impactos. Determinación de la altura de caída crítica.

En estas normas se hace referencia a los aspectos generales y particulares que son de aplicación a cada tipología de elemento de juego y pavimentos de los parques infantiles.

En el **apartado 5.2** se explican los diferentes términos empleados en la normativa referentes a los pavimentos de seguridad en los parques infantiles.

4.2 MATERIALES

El paso del tiempo provocó la evolución de los parques infantiles, y llevó consigo una mayor preocupación de las autoridades por la seguridad de sus usuarios, y con ello el empleo de diferentes alternativas como pavimentos de estas áreas. En los inicios de estos espacios lo más importante eran los diferentes juegos que se ubicaban para el uso de los usuarios, ya que estos eran los elementos con los que los niños iban a desarrollar sus actividades lúdicas, sin tener en cuenta la superficie sobre la que se colocaban, de forma que se podían encontrar juegos sobre cualquier tipo de pavimentos.

El paso del tiempo provocó la evolución de los parques infantiles, y llevó consigo una mayor preocupación de las autoridades por la seguridad de sus usuarios, y con ello el empleo de diferentes alternativas como pavimentos de estas áreas. En los inicios de estos espacios lo más importante eran los diferentes juegos que se ubicaban para el uso de los usuarios, ya que estos eran los elementos con los que los niños iban a desarrollar sus actividades lúdicas, sin tener en cuenta la superficie sobre la que se colocaban, de forma que se podían encontrar juegos sobre cualquier tipo de pavimentos.

Debido a que la gran mayoría de las lesiones sufridas en este tipo de áreas son el resultado de las caídas contra el suelo, en los últimos tiempos se ha realizado un importante esfuerzo en el estudio y desarrollo de superficies con alta capacidad de absorción de impactos, con el objetivo de minimizar los posibles efectos de un impacto.

4.2.1 CONDICIONES DE LOS PAVIMENTOS SEGÚN LA NORMATIVA EUROPEA VIGENTE

En la década de los años setenta en Estados Unidos la CPSC (Consumer Product Safety Commission) publica las primeras directrices de análisis de riesgos y seguridad para parques infantiles. De esta forma comienza una tendencia dirigida a la utilización de pavimentos con capacidad de amortiguación de caídas, sustituyéndose materiales como la tierra, el asfalto o el hormigón por otros materiales más agradecidos en caso de sufrir un impacto como son la gravilla, las virutas de madera, la arena o el caucho. No obstante, la aplicación de estas pautas ha sido progresiva, pudiéndose encontrar en la actualidad que la mayoría de las áreas de juego infantil cuentan con algún tipo pavimento de seguridad.

En Europa, la preocupación respecto a la seguridad en los parques infantiles tuvo como resultado el desarrollo de una serie de normativas publicadas a partir de 1997 que estandarizaban las normas europeas ya existentes en algunos países.

Actualmente se aplica la serie normativa EN 1176 y EN 1177, que tiene como objetivo mantener un nivel adecuado de seguridad cuando se juegue en los parques infantiles.

De las normas se extrae la conclusión de que ciertos elementos de los parques infantiles deben de contar con un pavimento de seguridad que permita cumplir con la

normativa vigente. Se establece el criterio de tener en cuenta la protección frente a lesiones en el espacio de caída de los juegos.

La norma define dos términos importantes para entender el sistema de protección frente a lesiones:

- Espacio de caída: espacio dentro, sobre o alrededor del equipo que puede ser atravesado por un usuario que caiga desde una parte elevada del equipo.
- Área de impacto: área en la que puede chocar un usuario tras caer a través del espacio de caída.

Por otra parte, se definen las dimensiones del área de impacto en función de su altura libre de caída. Para determinar dichas dimensiones habrá que tener en cuenta los posibles movimientos del equipo y del usuario.

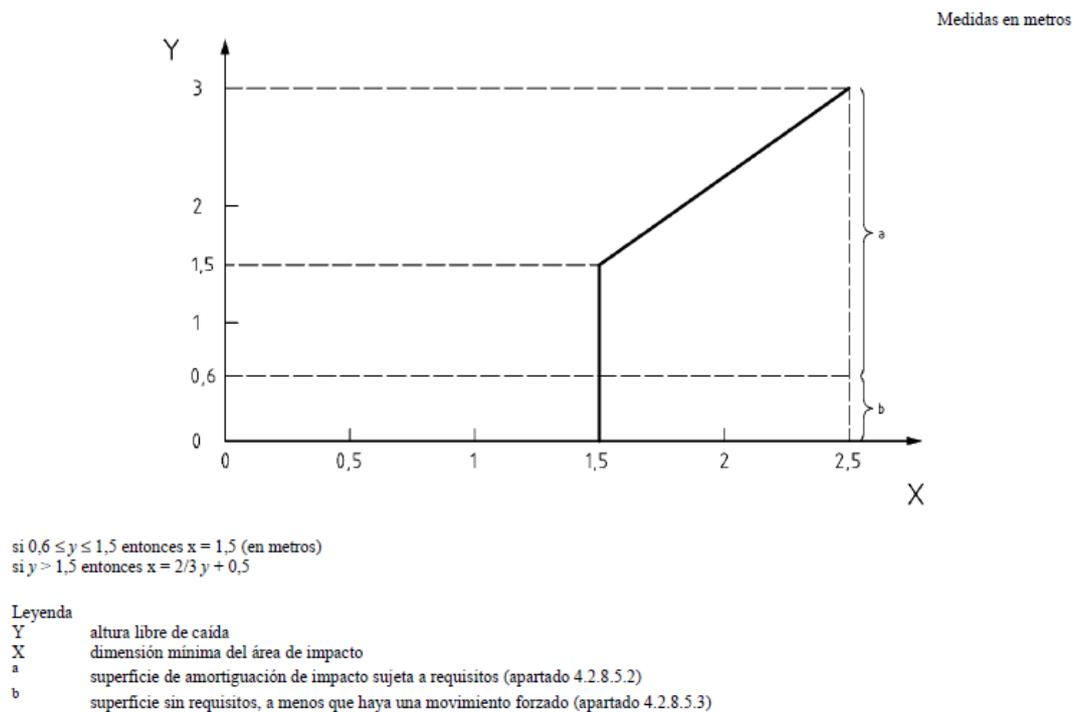
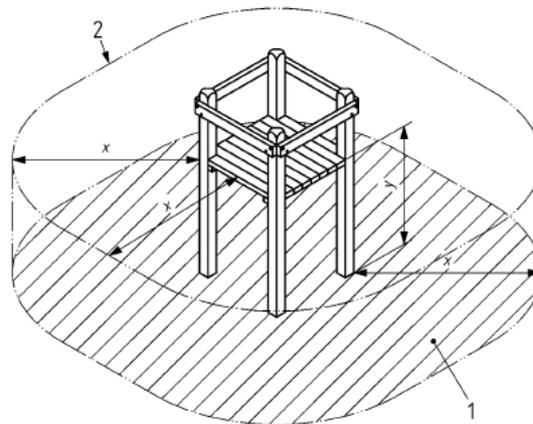


Figura 4-1 Dimensión del área de impacto (Fuente: Norma EN 1176-1)

Como se puede observar en la figura anterior, el alcance del espacio de caída debe ser al menos 1.50 metros. Esta distancia aumenta linealmente para alturas libre de caída entre 1.50 y 3 metros (esta última altura es la máxima permitida).

El espacio de caída se considera a partir de las partes elevadas del equipo, medidos horizontalmente y extendiéndose desde el plano de proyección vertical debajo del equipo. En la siguiente figura se puede observar cómo se determina el espacio de caída y el área de impacto de una plataforma.



Leyenda
1 área de impacto
2 espacio de caída
x dimensión del espacio de caída
y altura del espacio de caída

Figura 4-2 Ejemplo de espacio de caída y área de impacto de una plataforma (Fuente: Norma EN 1176-1)

Se indica que la superficie del área de impacto debe de estar libre de partes cortantes o salientes, y debe de estar instalada de modo que no se produzca ninguna situación de atrapamiento.

La superficie de amortiguación de impacto es necesaria en todo el área de impacto de los equipamientos con una altura libre de caída superior a 600 mm o que produzca un movimiento forzado en el usuario (caso de columpios, toboganes, balancines, etc.). Esto significa que los equipos con una altura libre de caída menor a 600 mm y sin movimiento forzado no requieren un área de impacto amortiguado.

En los casos en los que se precisa un área de impacto amortiguado, se establece que la altura de caída crítica de caída de esa superficie debe de ser igual o superior a la altura libre de caída del equipo instalado, de acuerdo a lo ensayado según la Norma EN 1177.

Por lo tanto, efectivamente, se llega a la conclusión de que en las superficies del área de caída de algunos elementos de elementos de juego es necesario el uso de ciertos materiales que doten al pavimento de una capacidad absorbidora de impactos.

4.2.2 MATERIALES EMPLEADOS EN ÁREAS DE JUEGO INFANTIL

La normativa recoge algunos de los materiales que se emplean habitualmente como pavimentos amortiguadores de impactos, que se pueden observar en la siguiente tabla.

Material ^a	Descripción Granulometría (mm)	Profundidad mínima ^b (mm)	Altura crítica de caída (mm)
Césped/sustrato natural	-	-	≤ 1000 ^d
Corteza	Granulometría de 20 a 80	200	≤ 2000
		300	≤ 3000
Viruta de madera	Granulometría de 5 a 30	200	≤ 2000
		300	≤ 3000
Arena^c	Granulometría de 0,2 a 2	200	≤ 2000
		300	≤ 3000
Gravilla^c	Granulometría de 2 a 8	200	≤ 2000
		300	≤ 3000
Otros materiales y otras profundidades	Según ensayo de HIC (véase la Norma EN 1177)		conforme a lo ensayado

a Materiales preparados adecuadamente para su uso en áreas de juego infantiles.
b Para los materiales no cohesionados, se añaden 100 mm a la profundidad mínima para compensar el desplazamiento (véase el apartado 4.2.8.5.1.)
c Sin partículas de lodo o arcilla. El tamaño de grano se puede identificar mediante un ensayo con un tamiz, como el que se indica en la Norma EN 933-1.
d Véase la NOTA 1 del apartado 4.2.8.5.2.

NOTA 1 El césped, además de su atractivo estético, también tiene ciertas propiedades de amortiguación de impacto. La experiencia demuestra que, en buenas condiciones de mantenimiento, suele ser eficaz para alturas de caída de hasta 1 m, y se puede utilizar sin necesidad de efectuar un ensayo. Para alturas de caída superiores a 1 m, el rendimiento del césped como superficie de amortiguación de impacto depende de las condiciones climáticas locales. Por tanto, como existen importantes variaciones regionales de clima por toda Europa, se recomienda establecer directrices a nivel nacional.

NOTA 2 Los materiales de amortiguación de impacto se someten a ensayo bajo condiciones específicas; por lo tanto, el rendimiento de dichos materiales puede variar según el uso (por ejemplo, materiales en condiciones de congelación).

NOTA 3 Los requisitos específicos para los equipos que provocan un movimiento forzado en el cuerpo del usuario (por ejemplo, columpios, toboganes, equipos de balanceo, etc.) se tratan en otras partes de la Norma EN 1176.

NOTA 4 Los materiales de amortiguación de impacto se deberían mantener de forma adecuada. El incumplimiento de un mantenimiento adecuado hace que se reduzca notablemente la amortiguación de impacto.

Tabla 4-1 Ejemplos de materiales de amortiguación de impacto empleados normalmente y sus correspondientes alturas críticas de caída, y notas (Fuente: Norma EN 1176-1)

A continuación, se describen brevemente los materiales más habituales.

4.2.2.1 Césped/sustrato natural.

El césped o sustrato se puede emplear con superficie de amortiguación de impactos en parques infantiles. No se permite su uso para alturas de caída libre mayores de 1 metro, debido a que sus propiedades amortiguadoras varían mucho en función de la meteorología.

Es una forma muy sencilla de adecuar un terreno para la construcción de un parque infantil, siempre que este no cuente con elementos con una altura libre de caída superiores a 1 metro. Además, no requiere de la realización de ningún ensayo una vez instalado.

Se acompaña una fotografía donde se observa un elemento de juego instalado sobre césped.



Ilustración 4-1 Pavimento de césped natural en Parque Infantil la Residencia, Santander (Fuente: Sanpe Ingeniería)

4.2.2.2 Corteza.

Pavimento formado por cortezas arbóreas colocada sobre la superficie de un parque infantil. Según la normativa, los tamaños de las cortezas deben estar entre 20 y 80 mm, y según el espesor pueden llegar a amortiguar adecuadamente caídas desde 3 m de altura.

Al menos en España, no es un material que se pueda ver frecuentemente.

En la siguiente imagen se observa como un parque que cuenta con dos columpios y un balancín, emplea como pavimento de seguridad la corteza.



Ilustración 4-2 Pavimento de corteza instalado Parque Infantil de Río Miño, Cambre
(Fuente: El Entorno Metropolitano)

4.2.2.3 Viruta de madera.

Las virutas de madera es otro material de lo que permite la normativa, pero que no se suele utilizar mucho en España.

Se exige una granulometría de 5 a 30 mm para las virutas, pudiendo alcanzar alturas de caída aproximadamente próximas a los 3 metros con espesores entre 20 y 30 cm, más 10 cm extras al tratarse de un material no cohesivo y compensar así lo posibles desplazamientos de material.

4.2.2.4 Arena

La arena es un material con un uso muy extendido en los parques infantiles. Es un material con muy bajo coste de adquisición, que ofrece muy buenos resultados de amortiguamiento, y convierte al pavimento de seguridad en un elemento más de juego

Como contrapartida, su coste de mantenimiento es relativamente elevado, que no permite el drenaje ni una buena accesibilidad a personas en sillas de rueda, limitando la integración social, y puede conllevar problemas para la salud en caso de que los niños lo ingieran.

La normativa indica que el tamaño de grano de la arena variará entre 2.2 y 2 mm.

Se acompaña dos fotografías de sendos parques infantiles que utilizan la arena como superficie amortiguadora de impactos



Ilustración 4-3 Suelo de arena instalado en Parque Infantil de Castrelos, Vigo (Fuente: Sanpe Ingeniería)



Ilustración 4-4 Suelo de arena instalado en un Parque Infantil (Fuente: Sanpe Ingeniería)

4.2.2.5 Gravilla

La gravilla también puede actuar como una cama amortiguadora de impactos. Se emplea con tamaños de grano entre 2 y 8 mm. Tiene particularidades similares a las de la arena.

En la imagen se puede ver una muestra de gravilla apta para su uso como material de amortiguamiento de áreas de juego infantil.



Ilustración 4-5 Muestra de gravilla (Fuente: Sanpe Ingeniería)

4.2.2.6 Otros materiales

La norma permite la utilización de otro tipo de materiales, no naturales, como superficies amortiguadoras de impactos en áreas infantiles.

Los espesores de estos materiales se escogen en función de la altura de caída crítica requerida para cada caso

Los fabricantes han trabajado en la elaboración de pavimentos aplicables a su instalación en parques infantiles.

A continuación, se indican algún material empleado como superficie amortiguadora.

4.2.2.6.1 Losetas de caucho

Losas prefabricadas de caucho que se elaboran mediante el moldeado del caucho, generalmente reciclado, en caliente. Habitualmente se incluye una geometría variable a la base del molde, lo que permite utilizar menos cantidad de material y conseguir propiedades amortiguadoras iguales, e incluso superiores a las fabricadas con todo el material, al integrar huecos de aire.

Se fabrican mediante la mezcla de caucho reciclado y resina, pudiendo fabricarse en diferentes espesores y dimensiones, generalmente de forma cuadrada de lado 0.50 o 1 metro.

Tienen buenas propiedades amortiguadoras, son de sencilla colocación en obra. Se instalan dejando juntas entre las losas.

A continuación, se puede observar una muestra de loseta de caucho girada, de forma que se puede apreciar el aligeramiento de la baldosa de caucho. También se indica un ejemplo de aplicación de losas a parques infantiles.



Ilustración 4-6 Muestra de losa prefabricada aligerada (Fuente: Sanpe Ingeniería)

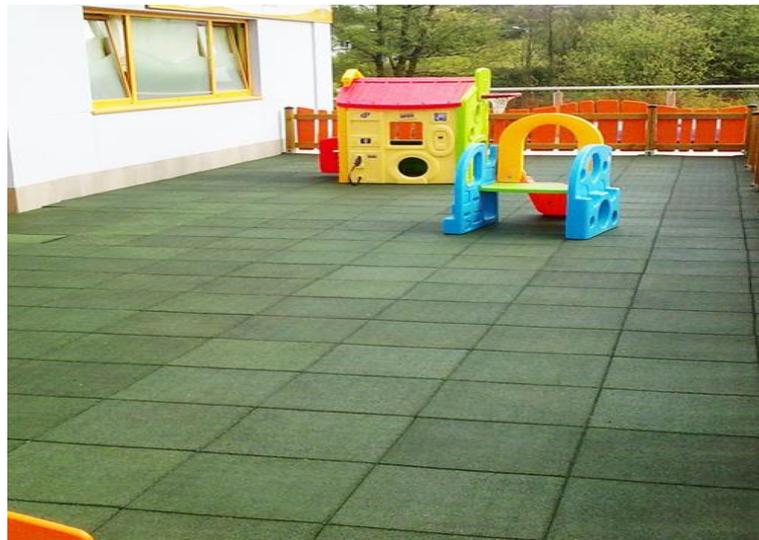


Ilustración 4-7 Pavimento de losetas de caucho instalado en un Parque infantil (Fuente: Vulgalia)

4.2.2.6.2 Caucho continuo

Son superficies que su puesta en obra es “in situ”, fabricándose el material en el momento de colocación. Normalmente se emplean dos capas, una capa base amortiguadora formada por SBR granular de color negro reciclado, y otra de acabado superficial de menor espesor de EPDM granular que habitualmente es de color. Ambas capas se ligan mediante resina de poliuretano.

Es una solución novedosa que presenta buenas propiedades, siendo muy resistente a las condiciones climáticas, antideslizante, no posee juntas, es fácil de limpiar y tiene una gran capacidad amortiguadora.

En la siguiente imagen se observa la disposición bicapa en este material, diferenciándose la parte negra del SBR de la amarilla del EPDM.



Ilustración 4-8 Muestra de caucho continuo (Fuente: Sanpe Ingeniería)

Su colocación en obra permite crear superficies con los dibujos y formas que se quieran al seguir un patrón, que resultan ser muy atractivos y divertidos para los niños.

Permite mejorar la amortiguación de una determinada zona ampliando el espesor fácilmente simplemente vertiendo mayor cantidad de SBR. Esto significa que pueden existir superficies planas, pero con diferentes espesores dependiendo de la zona por necesidades como tener un juego que requiere una altura de caída crítica muy alta en comparación con el resto de elementos.

En las siguientes fotografías se puede apreciar el caucho continuo aplicado como pavimento amortiguador de parques infantiles.



Ilustración 4-9 Pavimento de caucho continuo en Parque Infantil de Camarreal, Santander (Fuente: Sanpe Ingeniería)



Ilustración 4-10 Pavimento de caucho continuo en Parque Infantil de Gamazo, Santander (Fuente: Sanpe Ingeniería)

También se trabaja en cauchos continuos formados por sólo SBR reciclado que ofrecen propiedades amortiguadoras similares de una forma más económica. Se constituyen también de forma bicapa, con una capa base de SBR negro reciclado y resina, y una capa superior formada por SBR reciclado coloreado “in situ” y resina coloreada. Es una forma de obtener un material similar con mucho menor coste, ya que el EPDM es un material con mayor precio que el SBR. En este caso se reduce la calidad del acabado del producto, ya que las superficies coloreadas de SBR tienen a tener un mayor desgaste y pérdida del color.

4.2.2.6.3 Césped artificial

Ese material se emplea como revestimiento de parques infantiles, utilizándose como capa superficial sobre una base amortiguadora

Se utiliza de esta manera ya que tiene buenas propiedades resistentes ante las inclemencias del tiempo y al uso.

A continuación, se acompaña una fotografía de una muestra de la capa superficial empleada de césped artificial, y un ejemplo de su uso con una base amortiguadora de corcho.



Ilustración 4-11 Muestra de césped artificial (Fuente: Sanpe Ingeniería)



Ilustración 4-12 Sistema de base amortiguadora de corcho con aligeramientos y sistema de machihembrada, cubierta por césped artificial.

También se presenta una fotografía de un caso de aplicación del césped artificial en un parque infantil.



Ilustración 4-13 Pavimento de césped artificial instalado en Parque Infantil de Plaza de Rollo, Mayorga de Campos (Fuente: Propia)

4.2.2.6.4 Otros materiales

A continuación, se muestran otros tipos de alternativas de materiales empleados como pavimentos de parques infantiles, sin entrar en detalle.



Ilustración 4-14 Pavimento de chilsplay instalado en Parque Infantil Tetuán III, Santander (Fuente: Sanpe Ingeniería)



Ilustración 4-15 Muestra de recubrimiento de base amortiguadora (Fuente: Sanpe Ingeniería)



**Ilustración 4-16 Muestra de base amortiguadora formada por diferentes corchos reciclados
Fuente: Sanpe Ingeniería)**

Los pavimentos amortiguadores de impactos utilizados en este trabajo son de caucho continuo, por lo que en el siguiente apartado se trata el caucho de una forma más detenida.

4.2.3 CAUCHO

4.2.3.1 Caucho natural.

El caucho tiene su origen en su obtención de forma natural de dos árboles originarios del continente americano: el árbol *Castilloa Elástica* o *hule*: procedente de México y Centro América, y el árbol *Hevea Braziliensis*, autóctono de la selva Amazónica.

El proceso de obtención del caucho natural comienza con la extracción del tronco de estos árboles de una emulsión lechosa que se denomina látex. Esta sustancia se tamiza para eliminar las impurezas y se realiza otro tratamiento con ácido fórmico (CH₂O₂) para que las partículas en suspensión se unan. A continuación, se coloca la mezcla ya tratada en un molde y se compacta, dejándola secar, ya sea al aire por evaporación o mediante el ahumado, obteniendo un material solidificado al que se le denomina caucho crudo.

El caucho es casi el único polímero constituido por un hidrocarburo que se encuentra en la naturaleza. Las uniones de los monómeros del polímero presentan conformación cis en todos sus enlaces en el caucho natural, es decir, se constituye mediante la adición de 1,4 miles de unidades de isopreno. Los enlaces forman cadena de isoprenos perfectamente regulares, con enlaces dobles que dotan a la molécula del caucho natural la propiedad de reaccionar con sulfuro. En las siguientes figuras se observa la formación del isopreno, así como la forma de enlazar de estos que da lugar al caucho natural

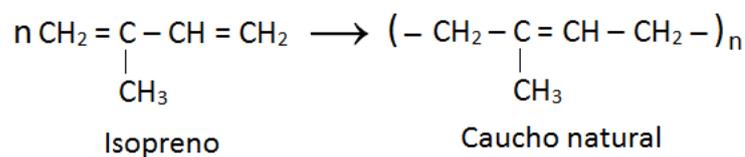


Figura 4-3 Formulación química del monómero y del polímero del caucho natural

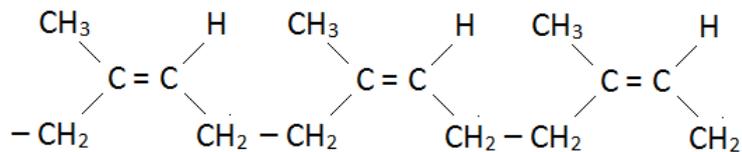


Figura 4-4 Enlace de polímeros.

El caucho natural está formado por largas cadenas lineales que se deslizan fácilmente unas sobre otras, lo que dota a este material de condiciones de viscosidad que hace que se comporte de forma diferente en función de la temperatura. Tiene cierta capacidad elástica en un rango de temperaturas determinado, ya que al cesar una fuerza que lo estira regresa a su posición original.

Estas propiedades hacen que el caucho natural sea excesivamente rígido y frágil a bajas temperaturas, mientras que es demasiado viscoso a una mayor

temperatura, lo que hace que este material tenga una difícil aplicación práctica y hace que sea necesario realizar algún tratamiento con lo que obtenemos el caucho sintético.

Entre los usos y aplicaciones del caucho natural, destaca su utilización como goma de borrar los trazos de los lápices, fabricación de neumáticos, suelas de zapatos, etc.

4.2.3.2 Caucho sintético.

Las propiedades del caucho natural hacen que este sea un material muy interesante con muchas posibles aplicaciones, lo que hizo que se comenzara a estudiar el material, obteniendo posibles tratamientos para perpetuar y mejorar sus características, ya que se obtenía un material impuro y con una viscosidad que limitaba en gran medida su utilización.

En la actualidad es posible la fabricación del caucho de forma artificial a partir de hidrocarburos insaturado. Los cauchos sintéticos más utilizados son el Polisopreno (IR), Polibutadieno (BR), Caucho de Nitrilo (NBR/HNBR), Estireno-Butadieno (SBR), Neopreno (CR), Caucho de Butilo (IIR/BIIR/CIIR), Caucho de Etileno-Propileno (EPM/EPDM).

Estos polímeros artificiales permiten obtener un material mucho más uniforme con menos impurezas y con una distribución más homogénea del peso molecular. De esta forma se obtiene un caucho libre de impurezas que limiten alteren sus propiedades, una gran resistencia química a ácidos, aceites minerales y gases, y un material estable en un rango de temperaturas mucho más amplio que el caucho natural, sobre todo a temperaturas más elevadas. En cualquier caso, son dos materiales con comportamientos muy similares, ya que al final con la fabricación del caucho sintético lo que se pretende es obtener un material que tenga las características del caucho natural pero que elimine parte de sus limitaciones.

4.2.3.3 Características del caucho.

En este apartado se explica brevemente las principales características del caucho,

En primer lugar, al caucho se le clasifica como un elastómero, lo que confiere al material propiedades elásticas. El caucho está formado por moléculas poliméricas desordenadas y entrelazadas. Al aplicar una fuerza en una dirección todas ellas se alinean según la dirección del estiramiento, mientras que cuando dicha fuerza cesa todas las moléculas vuelven a su posición original, dejando el material en el estado inicial.

Para definir a un polímero como un elastómero este debe de cumplir las siguientes condiciones:

- Las moléculas deben de tener la capacidad de rotar libremente alrededor del nexo de unión de cada monómero.
- La fuerza de atracción entre las cadenas debe ser baja para que deslicen entre ellas, como ocurre en lo líquidos.

- Las cadenas moleculares deben de unirse de forma química o por enlaces mecánicos por dos puntos a lo largo de cada cadena para así formar una red tridimensional.

Los puntos de enlace entre cadenas habitualmente se realizan mediante el proceso de vulcanización del caucho crudo, lo que hace que se pasen a tener moléculas localizadas homogéneamente, pero de forma arbitraria, en un material en estado sólido. Con la vulcanización se obtiene un estado sólido amorfo en equilibrio, lo que hace que este proceso de vulcanización debe de llevarse a cabo después de obtener la forma del producto final cuando el caucho está aún en estado semilíquido o plástico.

Las propiedades del caucho varían en función de si este es natural o ya ha sido vulcanizado.

Se aprecia un importante cambio en el comportamiento elástico. En la siguiente figura se representa un ensayo dinámico, en concreto la aplicación del primer ciclo de carga y descarga. Se puede observar como para alcanzar el mismo alargamiento, el caucho vulcanizado requiere la aplicación de cargas mucho mayores. Además, el caucho sin vulcanizar dista mucho de recuperar su longitud inicial una vez que cesa la carga aplicada, al contrario que el caucho vulcanizado que recupera prácticamente su estado inicial.

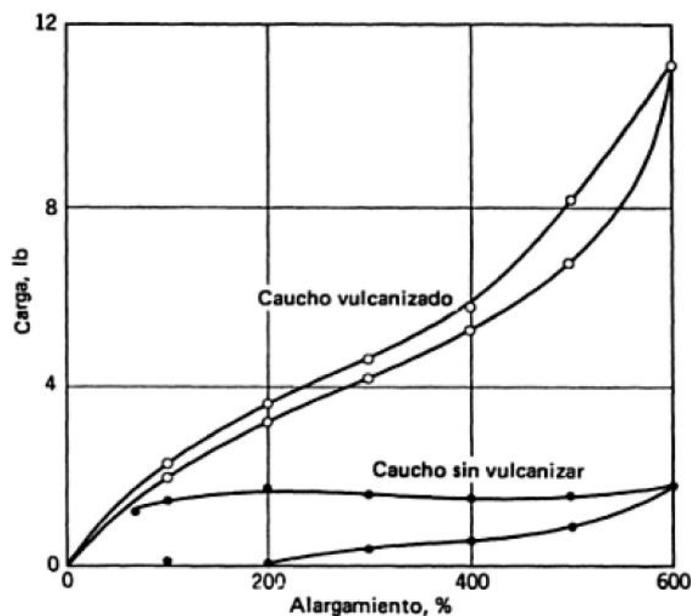


Figura 4-5 Comparación curva tensión-deformación de caucho vulcanizado y sin vulcanizar [Fuente: F. Billmeyer, Ciencia de los polímeros]

El comportamiento del caucho crudo es termoplástico, mientras que el del caucho vulcanizado es termoestable, lo que hace que el rango de temperaturas en los que no pierde propiedades sea muy diferente. El caucho natural funciona de forma similar entre 10°C y 60°C, pero una vez sometido al proceso de vulcanización este se

estabiliza entre -10°C y 100°C , lo que hace que se amplíe en gran medida el abanico de posibles usos del caucho.

El caucho vulcanizado, al contrario que el caucho crudo, tiene una alta resistencia a tracción y al desgarro, con una deformación permanente después de aplicar una carga casi nula. La resistencia a la abrasión también es mejor una vez vulcanizado. Además, es insoluble a disolventes comunes, como la gasolina, y es menos permeable. Todas estas propiedades hacen que en general tenga una mayor durabilidad, y permite utilizar el caucho en situaciones que sería imposible sin vulcanizar.

De hecho, existen muchas situaciones en las que las propiedades del caucho, incluso vulcanizado, son insuficientes en cuanto a resistencia a tracción, rigidez, desgarro, etc., por lo que hay que añadir rellenos a estos materiales para mejorar las propiedades.

4.2.3.4 Comportamiento elástico del caucho.

La elasticidad del caucho es una de las propiedades que puede explicar la capacidad amortiguadora ante impactos del material. En este apartado se pretende dar una visión general de la evolución acerca de este concepto.

Se han estudiado las propiedades elásticas del caucho desde el momento de su descubrimiento, ya que presenta una gran complejidad al no cumplir con la teoría clásica de sólidos elásticos. En 1932 Meyer explicó el comportamiento elástico del caucho considerando que las cadenas poliméricas que forman el caucho eran flexibles y podían rotar libremente entre ellas, de forma que la elasticidad de los elastómeros se podía aproximar con teorías cinéticas en vez de con teorías estáticas.

La elasticidad del caucho está directamente relacionada con su estructura molecular. El caucho está formado por largas moléculas entrelazadas que son capaces de comprimirse o alargarse al aplicar una fuerza exterior, volviendo al estado inicial una vez cesa la acción externa. La entropía de las cadenas disminuye al estirarlas, de manera que cuando desaparece la fuerza externa ocurre lo contrario y aumenta la entropía. Esto significa que el desorden molecular del caucho se ve modificado de acuerdo a las leyes de la termodinámica, alcanzando el caucho su máxima entropía (magnitud de desorden molecular máximo) cuando el material no está deformado, tendiendo a volver a este estado ante la ausencia de cargas exteriores, ya que el estado ordenado de las moléculas tiene menos probabilidades de ocurrencia que el orden aleatorio.

Kuhn y Treolar desarrollaron la primera teoría de elasticidad estática del caucho, siendo James y Guth los que posteriormente estudiaron el caucho idealizándolo como un elastómero ideal y analizando el comportamiento de las cadenas de manera aislada, considerando todas de la misma longitud y con el mismo número de enlaces. Estos últimos autores consideraban que la energía libre total es igual a la suma de la energía libre de cada cadena de forma aislada.

Según esta teoría, si se limita el alargamiento a una única dirección, el trabajo elástico total es equivalente a la fuerza de retracción y al cambio de longitud, por lo que la fuerza de retracción del caucho se debe a la disminución de la entropía al alargarse, es decir, al reordenamiento de las moléculas. Por lo tanto, el caucho se deforma al cambiar su configuración molecular, no al modificar la distancia entre las moléculas como puede ocurrir en los metales. En adicción, Kelvin demostró que la fuerza retráctil en el caucho aumenta al incrementar la temperatura, ya que las moléculas se mueven de forma más enérgica con el calor lo que provoca su acortamiento.

Por medio de la experimentación se demuestra que las cadenas no se mueven de forma independiente, sino que hay interacciones moleculares entre las cadenas que afectan al comportamiento del caucho. Por este motivo aparecieron las teorías de unión restringida y deslizamiento de enlace, que ya no basa toda la explicación en las cadenas moleculares. Las teorías moleculares más recientes tratan sobre la relación entre el módulo elástico y la deformación.

El caucho almacena una gran cantidad de energía al deformarse que se va disipando con el tiempo en forma de calor. Por este motivo los elastómeros presentan la forma de histéresis en su curva tensión-deformación.

La elasticidad en el caucho es un tema complejo que ha sido muy estudiado. Abarca gran cantidad de conceptos y mecanismos internos del material que hacen que sea muy complicado modelizar su comportamiento de una forma precisa. Aún se sigue profundizando sobre el comportamiento de este material, y sobre las variantes que la industria elabora de este material y que modifican su comportamiento.

4.2.3.5 Vulcanización

Las propiedades del caucho natural hacen que este sea un material muy interesante con muchas posibles aplicaciones, lo que hizo que se comenzara a estudiar el material y posibles tratamientos para perpetuar y mejorar sus características, ya que se obtenía un material impuro y con una viscosidad que limitaba en gran medida su utilización.

En 1834 los químicos Friedrich Ludersdorf y Nathaniel Hayward observaron que al añadir azufre a la goma de caucho se reducía su pegajosidad, es decir, cambiaba su viscosidad. Aprovechando estos resultados, en 1839 el estadounidense Charles Goodyear descubrió que cocinando el caucho con azufre desaparecían por completo las propiedades no deseables de este, llamando a este proceso vulcanización. Goodyear observó que el caucho adquiría un nuevo aspecto y mejores propiedades con la presencia de azufre y calor. El resultado de este proceso es un material sólido mucho más estable y duro pero que no pierde sus propiedades elásticas, convirtiendo el material en un elastómero.

La vulcanización consiste en introducir una red de enlaces entrecruzados entre los polímeros mediante la combinación del caucho crudo con azufre, además de otros

compuestos como rellenos, reforzantes, acelerantes y pigmentos bajo la acción del calor.

En definitiva, la vulcanización es el proceso químico por el cual se forma una red tridimensional de enlaces entre las moléculas que originalmente conforman el caucho crudo. Las cadenas moleculares quedan unidas después de este proceso, haciendo que el movimiento de estas no sea independiente, eliminando así la deformación plástica. Un caucho vulcanizado presenta un comportamiento elástico

El proceso interno químico que da lugar a este fenómeno ocurre de la siguiente manera: A lo largo de la molécula de caucho hay lugares conocidos como "sitios de cura" donde el azufre tiende a unirse y a formar una cadena que une con otro "sitio de cura" de otra molécula, creando así la red reticular de las moléculas. Estos puntos de cura o reacción están formados por átomos de hidrógenos alílicos, es decir, por un átomo de hidrógeno (H) unido a un átomo de carbono (C) que es adyacente a un enlace doble. En el caso del polisopreno o metilbutadieno, el átomo de azufre se une a un grupo metileno (CH₂) cercano al enlace doble donde el enlace es más débil, dando lugar a un tiol o mercaptano. A continuación, este nuevo compuesto se une al enlace doble de otra molécula obteniendo así la reticulación. En la siguiente figura se puede observar la representación de la reacción química del proceso de vulcanización.

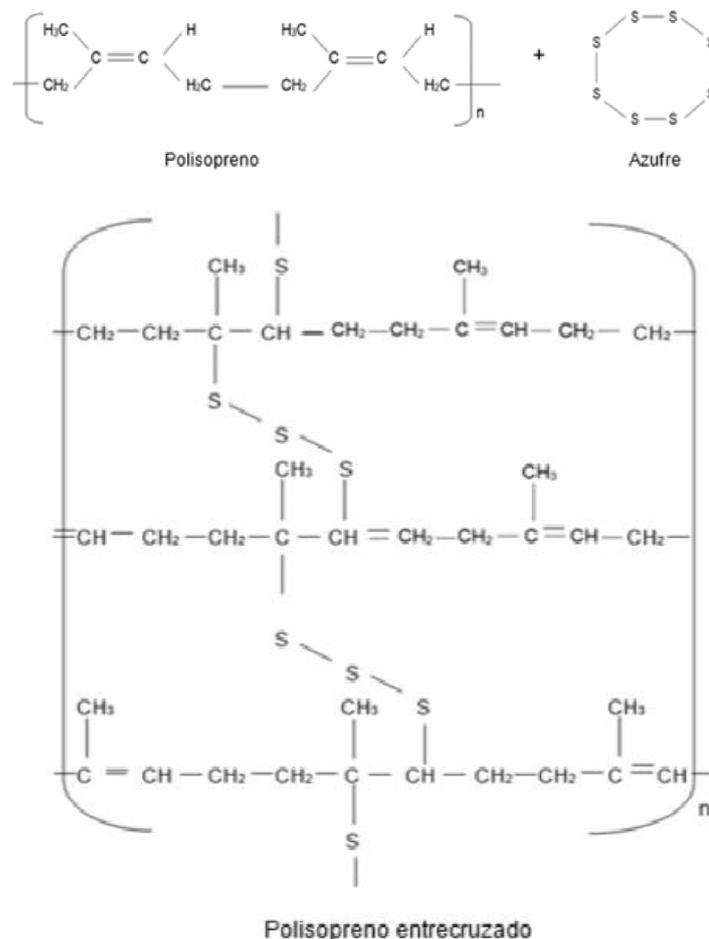


Figura 4-6 Reacción química del azufre con polisopreno durante el proceso de vulcanización

El azufre se encuentra en la naturaleza con una estructura molecular muy estable conocida como S₈, que reacciona con el caucho al cuando se incrementa la temperatura hasta el punto de fusión del azufre a 119°C.

El proceso de vulcanización con sólo azufre inicialmente duraba en torno a cinco horas, habiéndose reducido en la actualidad a tan sólo veinte minutos con el uso de otros elementos.

Actualmente hay otras muchas más formas de llevar a cabo el proceso de vulcanización a parte del uso de azufre. La utilización de peróxidos como agente vulcanizador hace que se formen enlaces de carbono más estables térmicamente. Se puede vulcanizar con peróxidos el caucho natural, el estireno-butadieno (SBR), polibutadieno (BR), nitrilo (NBR/HNBR), etileno-propileno (EPDM)

Entre los peróxidos más utilizados se encuentran el peróxido di(2,4-diclorobenzoilo), peróxido de benzoilo, t-butil perbenzoato y peróxido de dicumilo

También existen otros procesos de vulcanizado para algunos elastómeros en particular. Los óxidos metálicos se usan para la vulcanización del neopreno y las resinas fenólicas con cloruros metálicos para la vulcanización del caucho de butilo.

El proceso de vulcanizado depende de muchas variables, como son la temperatura, la presión, el tiempo de curado, la cinemática de la reacción y los componentes de la mezcla, que las empresas fabricantes de caucho tratan de controlar para conseguir los resultados deseados optimizando los costes de producción.

La industria ha ido evolucionando en la forma de fabricar el caucho para su posterior uso. Como ya se ha comentado y según la experiencia de los fabricantes, para para alcanzar la calidad requerida en el caucho no es suficiente con sólo el uso de azufre para el vulcanizado del caucho. Habitualmente se añaden varios componentes, naturales o sintéticos, con los que se pretende mejorar las propiedades del producto final.

El uso de aditivos debe de ser controlado, ya que un aditivo puede potenciar unas características determinadas, pero disminuir otros al mismo tiempo, por lo que debe de existir un equilibrio. Además, es necesario un buen mezclado de todos los elementos para garantizar un buen proceso de elaboración.

A continuación, se enumeran los tipos de aditivos que se suelen emplear en la fabricación del caucho:

- Agentes de vulcanización.
Uso principalmente de azufre, aunque también de selenio, telurio y mono cloruro de azufre para vulcanizar el caucho.
- Acelerantes.
Aumentan la velocidad de vulcanización del caucho mediante óxidos de metales, aldehidoaminas y guanidinas.

El uso masivo en la fabricación de neumáticos se ha convertido en un problema, ya que cuando estos se dejan de utilizar, podemos ver imágenes de vertederos donde se acumulan muchas toneladas de neumáticos fuera de uso (NFU), que supone un gran riesgo medioambiental en caso de incendio.

El SBR es un material que se puede reciclar, por lo que para aprovechar este material hay que seguir un proceso de reciclado, ya que el neumático no solo contiene caucho, sino que también está formado partes metálicas, entre otras cosas.

4.2.3.7 SBR reciclado

El proceso consiste en la trituración de los neumáticos fuera de uso hasta en tres fases, consiguiendo tamaños de grano entre 0.1 y 40 mm, posteriormente se separa el acero con separadores magnéticos y las fibras textiles por densidad.

Se obtiene el caucho SBR reciclado de NFU, de forma granulada, con diferentes tamaños de grano, tal y como se muestra en las fotografías.



Ilustración 4-17 Muestra de dos granulometrías diferentes de caucho SBR reciclado (Fuente: Sanpe Ingeniería)

La aplicación del SBR reciclado es muy variado empleándose entre otras cosas: como base granular en campos deportivos de hierba artificial, pistas de atletismo, uso ornamental, en carreteras como polvo en mezclas bituminosas y para el drenaje en rellenos de capas y zanjas, como capa drenante en vertederos, como pavimentos de seguridad, para las suelas de zapatos y como mantas antivibratorias en vías de ferrocarril.

Este tipo de caucho reciclado es el que se emplea en la fabricación de pavimentos de seguridad, de parques infantiles, tanto de losetas de caucho como de caucho continuo “in situ”, que al mezclarse con resina crea una capa amortiguadora base.

4.2.3.8 Caucho Etileno-Propileno-Dieno (EPDM)

Se trata de un caucho de sintetizado por primera vez en los años sesenta, siendo actualmente uno de los cauchos sintéticos con un uso más extendido,

El EPDM es un termopolímero elastómero con una buena resistencia a la abrasión y desgaste, conteniendo entre un 45 y un 75 % de etileno, el cual mejora su resistencia. Cuenta con buenas propiedades aislantes eléctricas, una adecuada

resistencia a agentes atmosféricos, ácidos, alcalis y productos químicos en general, y su rango de aplicación oscila entre los -40 y los 140 °C.

Su principal uso se encuentra en la industria del automóvil como sellante de juntas, fabricación de mangueras, tubos, cinturones, además de en el aislamiento de cables eléctricos, en el sellado de puertas y frigoríficos, y la impermeabilización mediante membranas de techos y canales y estanques artificiales de agua, y como pavimento de seguridad.

El EPDM se emplea en la formación de pavimentos amortiguadores de impactos en áreas infantiles debido a su buena capacidad de absorción de impactos, y que es fácilmente reparable y altamente resistente a las inclemencias meteorológicas. El EPDM vulcanizado en color se emplea como capa superficial de los pavimentos de caucho continuo “in situ” al mezclarse con resina de poliuretano

En la imagen se muestran gránulos de EPDM de color mezclados con resina, simulando la capa superior de un pavimento de seguridad.



Ilustración 4-18 Muestra de capa de 10 mm de espesor de EPDM vulcanizado en color marrón mezclados con resina (Fuente: Sanpe Ingeniería)

4.2.4 RESINA POLIMÉRICA

En la fabricación de pavimentos de seguridad, además del caucho, es necesario utilizar un ligante para conseguir crear una capa homogénea y cohesiva

La resina se puede definir como sustancia pegajosa, sólida o consistencia pastosa, que se puede disolver en alcohol, pero no en el agua y que se puede extraer naturalmente de plantas o fabricar de forma artificial.

La resina polimérica sirve para unir para las partículas de caucho en la formación de los elementos de caucho.

Destacan dos resinas poliméricas, resina epoxi y la resina de poliuretano (PUR) que se explica brevemente.

4.2.4.1 Resina de poliuretano, PUR

La resina de poliuretano PUR, es un polímero obtenido mediante la condensación de di-bases hidroxílicas combinadas con disocianatos.

Se pueden clasificar en termoestables o termoplásticos según su comportamiento a la temperatura,

- Los poliuretanos termoestables más habituales son las espumas, habitualmente empleados como aislantes térmicos.
- En cuanto a los poliuretanos termoplásticos, tienen muchas aplicaciones destacan los empleados en elastómeros, adhesivos selladores de alto rendimiento, fibras textiles, embalajes pinturas, juntas, sellantes, juntas, preservativos, componentes de automóvil, en la industria de la construcción, del mueble y múltiples aplicaciones más.

4.3 ENSAYOS

Para la realización de la parte experimental de este trabajo, se han realizado principalmente tipos de ensayos, con los que se han calculado las alturas de caída crítica y las rigideces de las muestras.

4.3.1 DETERMINACIÓN DE LA ALTURA DE CAÍDA CRÍTICA

Este es el ensayo utilizado para medir el HIC (Head Injury Criterion) de un pavimento amortiguador de un parque infantil, y que se realiza de acuerdo a la norma EN 1177, de manera que, si satisfacen los requisitos de ensayo, cumplen con los requisitos de amortiguación indicados en la Norma EN 1176-1.

A lo largo de este trabajo ya se ha hecho referencia al término HIC, por lo que en el presente apartado se explica cuál es el origen de este concepto tan importante en la evaluación de la amortiguación de los pavimentos de seguridad de los parques infantiles.

4.3.1.1 HIC O CRITERIO DE LESIÓN EN LA CABEZA

El HIC, Head Injury Criterion, que se traduce al castellano como Criterio de Lesión en la Cabeza, es un parámetro que se comenzó a utilizar para tratar de la evaluar la seguridad en caso de sufrir accidentes de tráfico.

Ante la expansión de la industria automovilística y la conversión del vehículo en un medio de transporte habitual, los accidentes y choques entre automóviles en las carreteras se convirtió en algo frecuente, con diferentes consecuencias, en muchos casos causando el fallecimiento de los usuarios de este medio de locomoción.

Los altos índices de mortalidad en carretera en la década de los 50 del pasado Siglo provocaron una reacción en los principales fabricantes, que empezaron a invertir en la mejora de la seguridad de sus productos, con el objetivo de evitar los accidentes y minimizar los efectos sobre las personas en caso de producirse.

De esta forma, a partir de los años 60 y 70, algunos vehículos empezaron a contar con sistema de seguridad tales como cinturones de seguridad, frenos ABS, etc., haciendo que los coches se convirtieran en un medio de transporte mucho más seguro.

Uno de los sistemas de seguridad implementados fue el conocido como airbag. Este elemento se trata de una bolsa que se llena de aire en caso de sufrir un impacto a una determinada intensidad, con la intención de que los ocupantes del vehículo impacten las partes de su cuerpo, principalmente la cabeza, contra dicha bolsa de aire en vez de contra las partes rígidas del auto. De esta forma las lesiones derivadas de un accidente pueden verse reducidas en gran medida.

Para desarrollar el airbag de una forma eficaz, hizo falta realizar multitud de simulaciones, conocidos como test de impactos. Para poder comparar los diferentes resultados obtenidos en las pruebas, se estimó necesario obtener un parámetro con el

que analizar los datos obtenidos de forma objetiva, para así poder observar las mejoras que producían los nuevos sistemas testados.

En este contexto, comenzaron a desarrollarse diferentes índices que trataban de cuantificar la intensidad de los impactos. Al tratarse de intentar medir los daños causados en un accidente sobre un ser humano, se hicieron diferenciaciones entre las diferentes partes del cuerpo.

El primer parámetro utilizado fue el Severity Index (SI), obteniendo la siguiente fórmula para el caso de la cabeza:

$$SI = \int_0^T (a(t))^{2.5} dt$$

Donde:

- T es la duración de la deceleración durante el accidente
- a (t) es la deceleración en el momento T

El índice 2.5 fue calculado de forma experimental y es el correspondiente para el índice de severidad en la cabeza, tomando un valor diferente en otros casos.

Este índice no reproducía de forma adecuada determinados accidentes, por lo que se siguió trabajando al respecto hasta llegar a dar con el Head Injury Criterion (HIC).

El HIC es una mejor aproximación a la realidad, ya para su cálculo se acota la duración del impacto, haciendo que se calcule el valor medio de la aceleración durante el momento más crítico de la deceleración, simulando mejor el impacto que se produce en la realidad.

El HIC se calcula con la siguiente formulación:

$$HIC = \left\{ (t_2 - t_1) \times \left[\frac{1}{(t_2 - t_1)} \times \int_{t_1}^{t_2} a(t) \times dt \right] ^{2.5} \right\} máx$$

Por lo que realmente, lo que se está haciendo es obtener el máximo valor durante el periodo crítico de tiempo ente t1 y t2 para la expresión que se encuentra entre llaves. De nuevo se encuentra el índice 2.5, que fue también el escogido en base a la parte experimental para determinar el daño en la cabeza.

En la siguiente figura se puede observar un ejemplo de la típica curva de aceleración en función del tiempo, que viene recogida en la norma EN 1177. Se puede apreciar que el área integrado es más pequeño al quedar reducido a un intervalo de tiempo, y tomando el área de toda la curva, de manera que así se simula de una forma más real un impacto.

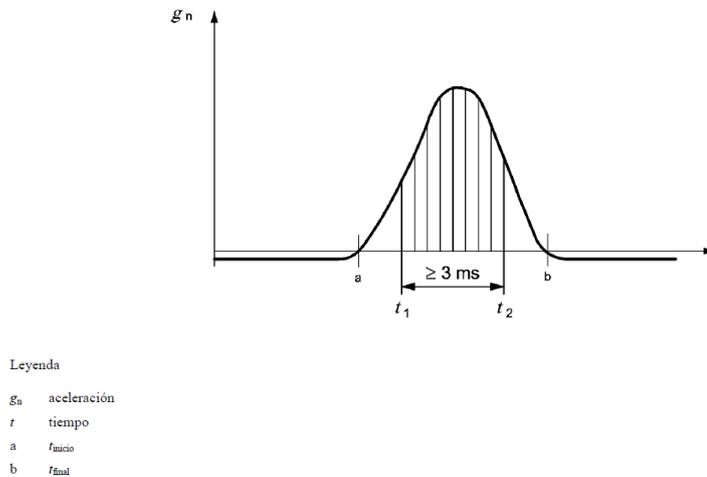


Figura 4-8 Ejemplo típico de trazado de la aceleración en función del tiempo (Fuente: Norma EN 1177)

4.3.1.2 Utilización del HIC en Parques Infantiles

Este es el criterio que se ha establecido para comprobar los niveles de seguridad de los pavimentos en los parques infantiles, quedando especificado en la norma EN 1177 la determinación de la altura de caída crítica.

Se ha aprovechado este criterio basándose en que las lesiones producidas en la cabeza a consecuencia de una caída son las más graves. Desde el comité que elaboró la normativa destacan que existen muchos factores que pueden influir en la gravedad de una lesión en la cabeza, además de la intensidad del impacto, como pueden ser la orientación del cuerpo, la violencia de la caída, la densidad ósea, etc. Se basan en investigaciones recientes que indican que la discapacidad permanente y lesiones en la columna pueden estar directamente relacionados por la duración del pulso de la aceleración, por lo que en la propia normativa se proponen tener en cuenta dichas investigaciones relativas al tema para próximas revisiones.

Lo que aplica la normativa está basado en análisis estadísticos, tomando 1000 como el valor máximo admisible de HIC para la gravedad de las lesiones que no sean susceptibles de tener consecuencias que produzcan discapacidad o la muerte en los usuarios que sufran un impacto contra el pavimento.

Estadísticamente hablando, según las notas de la norma y como se muestra en la siguiente tabla, el valor de 1000 de HIC es el valor equivalente para un adulto masculino medio a tener un 3% de probabilidad de sufrir una lesión crítica en la cabeza, un 18% de probabilidad de padecer una lesión muy grave, un 55% de tener una lesión grave, un 89% de lesión moderada, y un 99.5% de una lesión leve en la cabeza.

HIC	Lesión crítica (MAIS 5)	Lesión muy grave (MAIS 4)	Lesión grave (MAIS 3)	Lesión moderada (MAIS 2)	Lesión leve (MAIS 1)
1000	3%	18%	55%	89%	99.5%

Tabla 4-2 Probabilidad de sufrir lesiones en la cabeza para un HIC de 1000 para un adulto masculino medio (Fuente: Elaboración propia)

Este criterio hace que sólo se tenga en cuenta la energía cinética de la cabeza en el momento de sufrir un impacto contra las superficies del área de impacto.

Se considera que las superficies que satisfagan los requisitos de ensayo, cumplen con las Norma EN 1176-1 en cuanto a requisitos de amortiguación del impacto.

En el apartado 5.1.1 se explica cómo se lleva a cabo la realización del ensayo, así como el equipamiento necesario.

4.3.2 MÓDULOS DE RIGIDEZ

El paso de los trenes genera vibraciones que se transmiten al subsuelo a través de la estructura de la vía en forma de ondas, pudiendo causar efectos negativos sobre los edificios y las personas cercanas. Las mantas antivibratorias surgen como solución ante este problema, colocándose bajo el balasto o la vía en placa, consiguiendo reducir de forma eficaz las vibraciones.

Los materiales más utilizados para la fabricación de elementos antivibratorios son la lana de roca, el caucho, y más recientemente, partículas elastoméricas obtenidas a partir de neumáticos fuera de uso aglutinados mediante una matriz de resina polimérica.

Por lo cual, el caucho es un material que se emplea en la construcción de la estructura de las vías ferroviarias. Se utiliza mismo material reciclado SBR en la fabricación de mantas para la amortiguación y reducción del ruido y vibraciones al paso de los trenes por los carriles.

En general, el uso de estas mantas elastoméricas se puede realizar en tres posiciones. La primera posición trata de incluir una capa elástica entre el patín del carril y la parte superior del conjunto de las vías ferroviarias, lo cual reduce costes de mantenimiento y minimiza el impacto ambiental. También se puede insertar la capa elástica adicional entre la traviesa y el balasto en el caso conocido como suelas bajo traviesa (USP). Por último, en el caso de mantas bajo balasto (UBM), la manta antivibratoria se introduce entre el balasto y la subestructura.

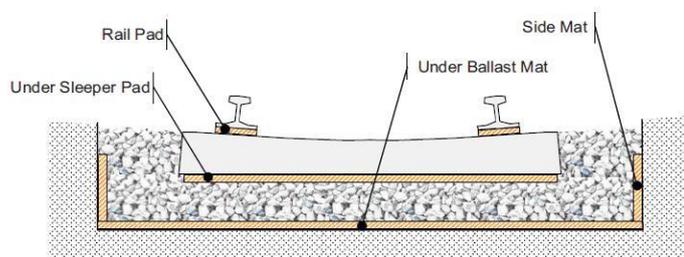


Figura 4-9 Sección transversal esquemática del uso de mantas elastoméricas

Este tipo de mantas es de aplicación en casi todos los tipos de transporte por ferrocarril, incluyendo las principales líneas de alta velocidad, líneas convencionales, líneas urbanas, líneas de metro y trenes de cercanías.

La colocación de estas mantas es especialmente útil en tramos de túneles, puentes, estaciones elevadas y estaciones de ferrocarril, ya que permiten reducir el ruido y las vibraciones que se generan al paso de los trenes, especialmente agravados en estos lugares en los que pueden transmitirse las vibraciones por el suelo a edificio cercanos y causar molestias a sus habitantes. Las mantas elásticas, también permiten realizar transiciones graduales entre zonas con gran diferencia en su rigidez.

Además, las mantas bajo balasto (UBM) permiten proteger el balasto, al tratarse este de un elemento rígido que está expuesto a su rotura ante la transmisión de las cargas. Con las mantas elásticas se introduce una mayor flexibilidad en el

sistema, produciéndose una mejor distribución de las cargas, disminuyéndose la máxima carga soportada por las traviesas, el balasto y la subestructura. Todo esto permite reducir el espesor necesario de balasto, lo cual puede ser un factor determinante en algunas situaciones como puede ser la construcción de túneles ferroviarios.

Su aplicación en la vía en placa es muy importante, ya que es un sistema mucho más rígido que el balasto tradicional. A continuación, se muestra un croquis de la sección transversal de una vía en placa, donde se puede apreciar la ubicación de las mantas antivibratorias bajo la losa.

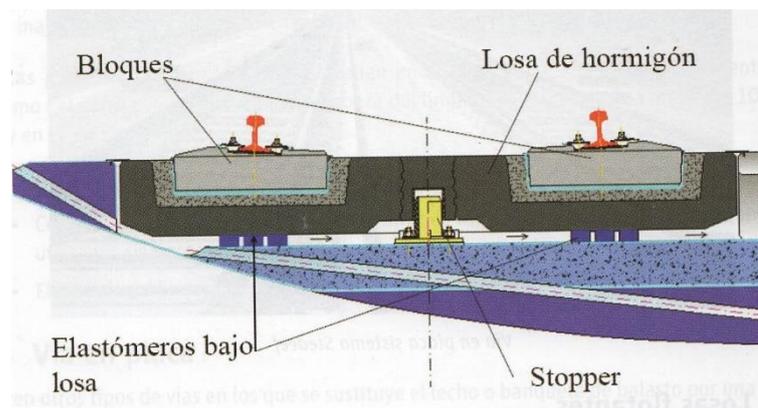


Figura 4-10 Sección transversal esquemática de la vía en placa

Para conseguir los efectos deseados con la utilización de estas mantas fabricadas con caucho, es importante tener controlados ciertos parámetros. Este control debe de ser exhaustivo, ya que los elementos fabricados van a formar parte de la estructura de la vía que requiere de un gran nivel de seguridad para garantizar su buen funcionamiento ante el paso de los vehículos ferroviarios.

En España, el Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (ADIF) es el encargado de la construcción de líneas de ferrocarril. Este ente público es el encargado de elaborar las especificaciones técnicas de los materiales a emplear en las nuevas líneas, por lo que para el suministro de las mantas antivibratorias ha elaborado un documento denominado “Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares Para la Contratación del Suministro y Transporte de Manta Antivibratoria de Atenuación Alta”.

En este pliego se incluyen las especificaciones técnicas que deben de cumplir las mantas antivibratorias de atenuación alta, así como los diez ensayos que hay que realizar.

De los ensayos realizados para las mantas antivibratorias, destacan para la realización del presente trabajo los ensayos de rigidez, en los que se obtienen el módulo estático C_{est} y el módulo dinámico a baja frecuencia C_{din} .

Estos dos ensayos obtienen los parámetros de rigidez en condiciones estáticas y dinámicas. Estos parámetros, a priori, pueden tener relación con la amortiguación de los materiales.



Investigadores de la propia Universidad de Cantabria han llegado a la conclusión de que el caucho revalorizado con la granulometría adecuada y ligado con resina de poliuretano en las proporciones adecuadas, se puede utilizar unido en una capa con el espesor óptimo como manta atenuadora de las vibraciones en ferrocarriles.

4.3.2.1 Módulo de rigidez estático, C_{est} .

El módulo de rigidez estática es un parámetro que representa la deflexión vertical de la vía al paso de trenes a baja velocidad. En la práctica registra valores entre $0,01 \text{ N/mm}^3$ y $0,15 \text{ N/mm}^3$.

4.3.2.2 Módulo de rigidez dinámica, C_{din}

La rigidez dinámica se corresponde con el módulo dinámico secante de balasto a baja frecuencia, C_{din} . Con el módulo de rigidez dinámico se determina la deformación dinámica de la vía bajo cargas que pasan a velocidad de operación, que se relaciona con la deflexión vertical de la vía debido a la carga que pasa por el eje vertical. También se determina la capacidad de las mantas bajo balasto (UBM) para filtrar las vibraciones, relacionada con las fuerzas de contacto debido a que las superficies de la rueda y el carril no son lisas, y también depende de la distancia entre traviesas.

5 METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN.

Para realizar la investigación del proyecto se han fabricado muestras de pavimentos de caucho continuo de diferente tipología, las cuales se someten a diferentes ensayos para proceder a su caracterización.

5.1 ENSAYOS.

En este apartado se describen los ensayos realizados sobre el conjunto de muestras fabricadas para este trabajo, y descritas en el apartado 5.2, con el objetivo de caracterizar las muestras y ver la influencia de las distintas variables en su comportamiento.

5.1.1 Determinación de la altura de caída crítica.

El ensayo de determinación de la altura de caída crítica es el que se emplea según la Norma EN 1177:2008 para evaluar los niveles de seguridad de los revestimientos de las superficies de las áreas de juego.

Es por ello que se ha decidido utilizar este ensayo sobre las muestras fabricadas, ya que el tipo de pavimento utilizado tiene como aplicación su ubicación en parques infantiles para tratar de amortiguar las posibles caídas y disminuir los efectos de estas que podrían causar lesiones de diferente gravedad en los usuarios de estos espacios, cumpliendo con los requisitos respecto a la altura de caída crítica especificadas en la norma EN 1176.

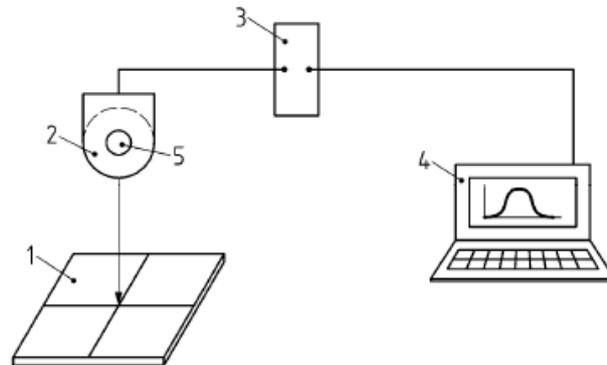
5.1.1.1 DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO.

El método de ensayo se realiza conforme a la Norma EN 1177:2008.

Una vez escogida la superficie sobre la que se va a realizar el ensayo, y un punto específico de la misma, se procede a golpear con la cabeza-maniquí el pavimento en cuatro ocasiones desde diferentes alturas de caída.

La cabeza-maniquí posee en su interior un acelerómetro que capta las aceleraciones de cada impacto. El acelerómetro emite una señal que capta el ordenador a través de un sistema de transmisión de datos, el cual tiene un software que procesa los valores de energía medidos en el impacto, obteniendo como resultado un nivel de gravedad que se define como criterio de lesión en la cabeza HIC (Head Injury Criterion).

Para determinar la altura de caída crítica se sigue el siguiente dispositivo de ensayo indicado en la figura y explicado en el párrafo anterior.



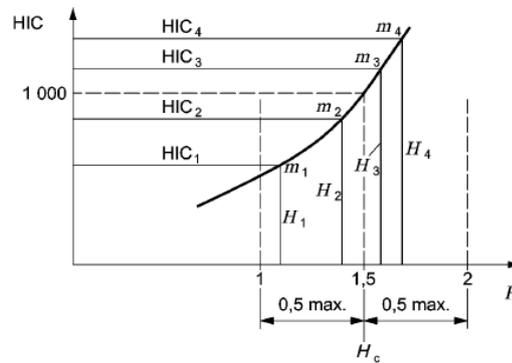
- Leyenda
- 1 probeta de ensayo
 - 2 cabeza-maniquí
 - 3 amplificador de carga (opcional)
 - 4 ordenador
 - 5 acelerómetro

Figura 5-1 Dispositivo de ensayo para determinar la altura de caída crítica (Fuente: Norma EN:1177)

Se representan gráficamente los valores de la altura de caída frente a los HIC obtenidos en cada impacto, y se calcula mediante interpolación la altura de caída crítica que es la correspondiente a la altura de caída más baja que produce un HIC con un valor igual a 1000, valor correspondiente a la probabilidad de un 3% de sufrir una lesión crítica en la cabeza.

Para la realización del ensayo se deben realizar cuatro impactos desde diferentes alturas, de forma que dos de esos impactos se realicen desde una altura inferior a la de la altura de caída crítica dentro de los 0.50 metros inmediatamente inferiores a esta, y los otros dos impactos se realicen desde una altura superior a la altura de caída crítica dentro de los 0.50 metros inmediatamente superiores a esta. Expresado de otra forma, dos de esos impactos deben obtener un valor de HIC inferior a 1000, y otros dos impactos un valor de HIC por encima de 1000, estando los cuatro impactos en un intervalo de un metro.

En la siguiente figura se representa una gráfica tipo de las alturas de caída frente al HIC.



Leyenda

- m mediciones de impacto
- H altura de caída
- H_c altura de caída crítica

Figura 5-2 Curva típica de los índices HIC en función de la altura de caída (Fuente: Norma EN 1177)

5.1.1.2 Condiciones de ensayo e hipótesis adoptadas.

5.1.1.2.1 Condiciones de ensayo

Según el apartado 4.4.1. de la norma EN 1177:2008, para la realización de ensayos en laboratorio deben darse las siguientes condiciones:

- Los ensayos se deben realizar a una temperatura de $23\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$.
- Los ensayos se deben efectuar sobre un soporte de hormigón rígido plano o una superficie equivalente, con la masa, densidad y espesor suficientes para que su deformación durante los ensayos no afecte de modo considerable al resultado de los mismos.
- Para los ensayos de los revestimientos que van a fabricarse *in situ* se debe efectuar uno de los siguientes preparativos, sin juntas ni empalmes:
 - a) al menos una probeta con una dimensión total mínima de $1\text{ m} \times 1\text{ m}$, situada sobre un soporte rígido (4.4.1.2), conforme a las instrucciones del fabricante;
 - b) al menos nueve probetas distintas, cada una de ellas no menor de $500\text{ mm} \times 500\text{ mm}$, extendidas sobre un soporte rígido y plano (4.4.1.2), conforme a las instrucciones del fabricante.

5.1.1.2.2 Hipótesis adoptadas para la realización de los ensayos.

- **Temperatura:**
Todos los ensayos se han efectuado en condiciones de temperatura acordes con las indicadas en la normativa, $23\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$.
- **Soporte:**
Los ensayos en ambas fases se han realizado sobre superficies rígidas con espesor suficiente, de forma que su deformación durante los ensayos no afecta de forma considerable al resultado.
Ambas fases no pudieron realizarse sobre el mismo soporte por cuestiones de disponibilidad de espacios. La primera fase se realizó sobre un solado de baldosas cerámicas, mientras que la segunda fase se realizó sobre una losa de hormigón.
- **Dimensiones y cantidad de probetas:**
En este proyecto se ha procedido a ensayar muestras que están concebidas para fabricarse *in situ* como revestimiento. Siguiendo la normativa, deberían de haberse fabricado probetas de 1 m x 1 m, o nueve probetas de dimensiones mayores de 500 mm x 500 mm por cada tipo de muestra empleada.
Se ha decidido fabricar una única probeta de 500 mm x 500 mm por cada tipología de muestra, de forma que se adopta el caso b), pero reduciendo la fabricación de muestras. Se toma esta decisión por las limitaciones del trabajo a realizar, de forma que con la misma cantidad de material se pueden fabricar probetas de un mayor número de tipologías diferentes, pudiendo ampliar el estudio sin generar un mayor coste en material y transporte. Además, en base a la experiencia de las empresas especialistas participantes, ya que cuando todas las probetas están bien fabricadas, lo habitual es que no haya una gran variación en los resultados.
- **Punto de ensayo:**
El ensayo se realiza sobre el punto medio de la probeta, que es el punto más alejado de las discontinuidades de los extremos, los cuales no simulan su situación una vez fabricados *in situ*.
- **Número de ensayos:**
Para la realización de este proyecto, se ha decidido realizar tres ensayos de determinación de la altura crítica de caída en cada probeta, con el objetivo de dotar al ensayo de una mayor fiabilidad.
Los tres ensayos se realizan sobre el punto medio de la probeta. En este caso la normativa indica que hay que asegurarse de que la distancia entre dos posiciones de ensayo cualquiera no es inferior a 250 mm, y que ninguna posición está más cerca de 250 mm desde

el borde de la probeta. Siendo la probeta empleada de 500 mm x 500 mm, el único punto que lo cumple es el central.

- Marco:
Se ha utilizado un marco de madera de dimensiones interiores 1 m x 1 m, en el que se colocan cuatro probetas con el objetivo de que la probeta a ensayar quede parcialmente confinada, de manera que no quede supeditada a posibles movimientos laterales simulando así su colocación *in situ*.

- Resultado del ensayo de determinación de la altura de caída crítica:
Según la normativa, el resultado de la altura de caída crítica para el revestimiento ensayado debe expresarse en metros, redondeado al decimal inferior (por ejemplo, 1.59 m se redondearía como 1.50 m). Para este proyecto se ha decidido tomar el resultado con dos decimales, tratando así de aprovechar al máximo la precisión que ofrece el equipo y así evidenciar aún más la diferencia de resultados entre las distintas muestras.
Además, al realizar sobre la misma probeta tres ensayos, a nivel de estudio, se considera el resultado de la muestra el valor medio de los tres ensayos ejecutados con dos decimales. En este caso, la normativa indica que el resultado es el del ensayo en el que se obtiene una menor altura de caída crítica redondeado al decimal inferior.

5.1.1.3 Equipo empleado.

5.1.1.3.1 Equipo de medición de HIC triaxial.

Para la realización de los ensayos se utilizó un equipo de medición de HIC modelo Ludometre V2 triaxial, perteneciente a la empresa Sanpe Ingeniería, S.L., organismo de inspección de parques infantiles acreditado por ENAC.

El equipo está calibrado y acreditado por ENAC para la realización de ensayos de determinación de la altura de caída crítica, por lo que cumple con todas las disposiciones de la norma EN 1177.

El equipo de ensayo empleado consta de las siguientes partes:

- Cabeza-maniquí:
Consistente en un proyectil de aleación de aluminio con extremo hemisférico con un diámetro de 160 mm \pm 5 mm, una masa de 4,6 kg \pm 0,05 kg, con una desviación máxima de la superficie hemisférica de 0,5 mm.
Tiene incorporado en su interior contiene un acelerómetro triaxial, ubicado en el centro de gravedad de la cabeza-maniquí. También se

permite el uso de acelerómetros uniaxiales en cabezas-maniquí guiada en el eje vertical.

La parte de la cabeza-maniquí que choca con la superficie, situada entre el límite inferior y el acelerómetro, deber ser homogénea y sin huecos.

En la imagen se puede ver la cabeza maniquí empleada.



Ilustración 5-1 Cabeza maniquí con acelerómetro triaxial (Fuente: Sanpe Ingeniería)

- Sistema de liberación:
Se emplea un sistema de liberación conformado por un electroimán que libera la cabeza-maniquí cuando se aprieta el pulsador.
Se mantiene la cabeza maniquí elevada con la ayuda de un trípode y una cuerda que permite variar la altura.
Con este sistema de liberación, conforme a la norma, para el ensayo de impacto en caída libre, no produce un momento de rotación ni cualquier otra fuerza sobre la cabeza-maniquí al liberar ésta.
A continuación, se muestra el sistema de liberación empleado.



Ilustración 5-2 Sistema de liberación (Fuente: Sanpe Ingeniería)

- Equipo para medición de impactos, consistente en un sistema de medición mediante acelerómetro, un dispositivo de registro, y un programa de cálculo HIC.
- Sistema de medición mediante acelerómetro:
El acelerómetro triaxial empleado se encuentra en la cabeza-maniqui, y cumple con las siguientes condiciones que se indica en la Norma EN 1177:
 - Sistema de medición mediante acelerómetro, capaz de medir todas las frecuencias en la gama de 0,3 Hz hasta 1 000 Hz, y que tenga una respuesta suficiente en todas las frecuencias para mantener los errores de amplitud por debajo del 5%, conforme a la Norma ISO 6487. Debe ser capaz de medir, registrar y mostrar la aceleración y el tiempo de duración de cada impacto completo.
- Dispositivo de registro:
El equipo dispone un equipo de registro, que de acuerdo a la norma:
 - Dispositivo de registro, capaz de capturar y registrar las señales del tiempo de aceleración que se producen durante un impacto, con una frecuencia mínima de muestreo de 10 kHz. El acondicionamiento y filtrado de la señal debe ser compatible con el acelerómetro, y el canal de datos especificado debe ajustarse a la Norma ISO 6487.
- Programa:
Se dispone del software denominado “Ludometre” para calcular el valor de HIC para el historial del tiempo de aceleración registrado de cada

impacto, conforme a lo especificado en el apartado 4.3.1.1., calculándose el HIC con la siguiente fórmula que está programada en el software:

$$HIC = \left\{ (t_2 - t_1) \times \left[\frac{1}{(t_2 - t_1)} \times \int_{t_1}^{t_2} a(t) \times dt \right] \right\}^{2.5} \text{máx}$$

- **Trípode:**
Para la realización de los ensayos, se ha empleado un armazón de tres pies plegables y articulados, que permiten suspender la cabeza maniquí y liberarla cuando se desee sobre el punto deseado.



Ilustración 5-3 Realización de un ensayo de determinación de la altura de caída crítica "in situ" con un trípode (Fuente: Ingeniería Sanpe)

- **Termo-higrómetro**
Para controlar las condiciones del ensayo, se han tomado medida de la temperatura y humedad relativa con un termohigrómetro calibrado por ENAC para tal efecto.



Ilustración 5-4 Termo-higrómetro (Fuente: Sanpe Ingeniería)

5.1.2 ENSAYO DE RIGIDEZ ESTÁTICA, C_{EST} .

Este ensayo es el empleado según el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares elaborado por ADIF para la contratación del suministro y transporte de mantas antivibratorias de atenuación alta.

El módulo de rigidez estática es un parámetro que representa la deflexión vertical de la vía al paso de trenes a baja velocidad. En la práctica registra valores entre 0,01 N/mm³ y 0,15 N/mm³.

5.1.2.1 Descripción del ensayo

Según lo dispuesto en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares, la probeta de caucho se posiciona entre dos placas de acero que simulan una vía en placa, o entre una placa de acero y otra simuladora de balasto localizada sobre la parte superior de la muestra que simula el caso de vía con balasto.

A través de una rótula se aplican los tres ciclos de carga, definidos por un proceso de carga de compresión seguido de una descarga completa, pasando 5 minutos en reposo entre cada ciclo de carga y descarga.

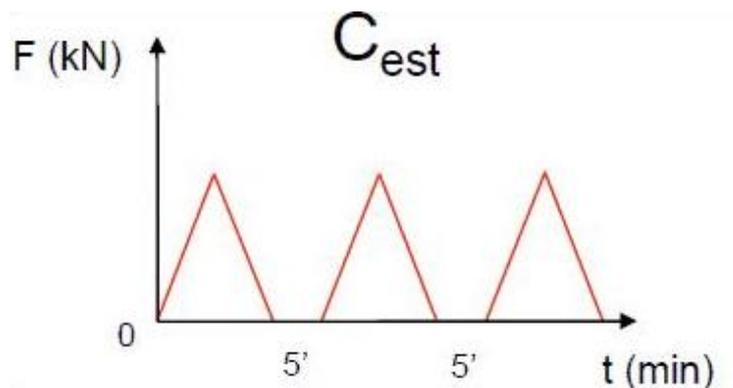


Figura 5-3 Esquema de ensayo de rigidez estática

La rigidez estática se calcula de acuerdo a la siguiente expresión:

$$C_{est} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{S_{max} - S_{min}} \left(\frac{N}{mm^3} \right)$$

Sólo se tiene en cuenta el último ciclo para realizar el cálculo del módulo de rigidez estática, C_{est} , que se determina como el módulo secante entre una tensión mínima σ_{min} de 0,02 N/mm² y una máxima σ_{max} de 0,10 N/mm² según la expresión (1), donde S_{min} y S_{max} son los desplazamientos correspondientes a la tensión mínima y máxima, respectivamente.

5.1.2.2 Condiciones de ensayo e hipótesis adoptadas.

En el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares de ADIF se indican los siguientes parámetros de ensayo:

PARÁMETROS DE ENSAYO	VALOR
Módulo a determinar	C_{est} (N/mm ³) (módulo secante)
Tensión mínima σ_u	0.02 N/mm ²
Tensión máxima σ_o	0.10 N/mm ²
Tensión mínima (ciclo)	0.00 N/mm ²
Tensión máxima (ciclo)	0.11 N/mm ²
Temperatura de ensayo	Temperatura ambiente (23±3)°C
Dimensiones de la muestra	300 x 300 mm ² x espesor
Cantidad de muestras	3
Ciclos de carga	3 ciclos; se valorará el tercer ciclo de carga
Velocidad de la carga	1 mm/min
Superficies de carga	Placas de acero planas y desengrasadas con una rugosidad $R_a \geq 3,2$ según DIN 4766-2 y placa normalizada de balasto según DIN 45673-1.

Tabla 5-1 Parámetros de ensayo para la determinación del módulo de rigidez estática C_{est}
(Fuente: ADIF)

5.1.2.2.1 Hipótesis adoptadas para la realización de los ensayos

El ensayo de rigidez estática se ha realizado cumpliendo con las especificaciones anteriores, excepto en cuanto a dimensiones de la muestra y cantidad de muestras debido a las limitaciones del trabajo, por lo que al respecto se han tenido en cuenta las siguientes consideraciones:

- Dimensiones de la muestra:
Se han empleado muestras con dimensiones 500 x 500 mm² x espesor, por lo que son diferentes a las especificadas.
Se ha tomado esta decisión debido a la limitación de material, ya que para la realización del ensayo de determinación de la altura de caída crítica eran necesarias muestras de al menos estas dimensiones, por lo que se ha aprovechado este tamaño mayor para realizar este ensayo sin necesidad de hacer cortes que pudieran dañar las muestras. Se estima que no existe una gran alteración de los resultados al aplicarse la carga centrada sobre las muestras con las placas de 300 x 300 mm².

Además, teniendo en cuenta que este ensayo no es destructivo, dejaba abierta la posibilidad de volver a repetir el ensayo de determinación de altura de caída crítica en caso de que fuera necesario.

- Cantidad de muestras:
 Se ha realizado el ensayo sólo con una muestra de cada tipología en vez de tres veces como indica el pliego.
 La experiencia de los investigadores dice que se trata de un ensayo muy fiable, por lo que era una mejor opción destinar los recursos limitados de cantidad de material a realizar otras probetas que a realizar 3 iguales para realizar este ensayo conforme a las especificaciones, para, previsiblemente, obtener resultados muy parejos.

- Se ha dado el valor de C_{est} con unidades $\frac{N}{mm}$ en vez de $\frac{N}{mm^3}$. Este cambio de unidades responde a que no se ha aplicado la división por el área de aplicación de las cargas. A efectos del resultado y análisis no cambia nada, de hecho, estas unidades responden a las empleadas generalmente para referirse a la rigidez, $\frac{N}{mm^3}$ realmente es la rigidez por unidad de área.

5.1.2.3 Equipo empleado.

En este ensayo se utilizaron los equipos que dispone el Laboratorio de la División de Ciencia e Ingeniería de los Materiales (LADICM) de la Universidad de Cantabria. Para la realización del ensayo fue necesaria la máquina servo-hidráulica universal de ensayos y cuatro captadores de desplazamiento LVDT, con registro de salida continua, en cada una de las esquinas del sistema manta – placas. Para asegurarse de la linealidad del esfuerzo aplicado se empleó un sistema de rótula.



Ilustración 5-5 Disposición del ensayo de rigidez (Fuente: LADICIM)

5.1.3 ENSAYO DE RIGIDEZ DINÁMICA, C_{DIN}

El módulo de rigidez dinámica de balasto a baja frecuencia C_{din} de la manta determina el grado de atenuación de la vibración conseguido por la colocación de esta frente al mismo paquete de vía sin ella, así como la deformación de la vía en condiciones de servicio.

5.1.3.1 Descripción del ensayo.

En el ensayo, según lo indicado en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares, se posiciona la muestra entre dos placas de manera análoga al ensayo de rigidez estática.

A través de una rótula se aplican esta vez 1000 ciclos de carga de compresión y descarga de forma sinusoidal para cada una de las frecuencias de ensayo.

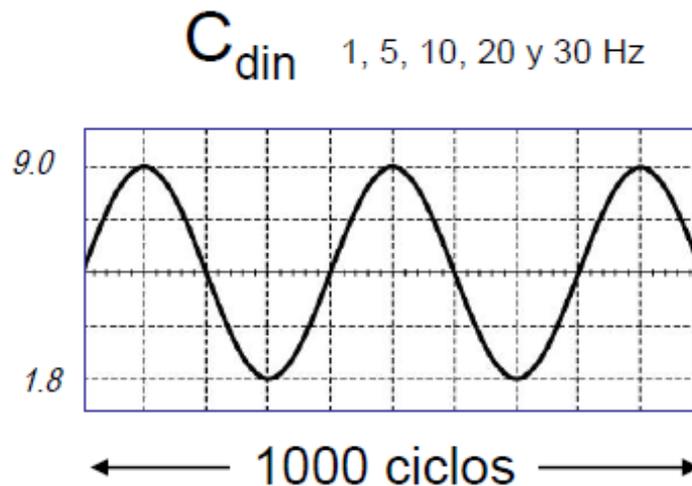


Figura 5-4 Esquema de ensayo de rigidez dinámica

Se calcula el valor del módulo de rigidez dinámica para cada frecuencia teniendo en cuenta los 5 últimos ciclos de cada bloque de ondas, utilizando la siguiente expresión:

$$C_{din} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{S_2 - S_1} \left(\frac{N}{mm^3} \right)$$

Nota: a efectos de resultados, se ha dado el valor de C_{din} con unidades $\frac{N}{mm}$. Este cambio de unidades responde a que no se ha dividido por el área de aplicación de las cargas.

Este valor se calcula como la división entre una variación de tensión aplicada mínima σ_1 de 0,02 N/mm² y máxima σ_2 de 0,10 N/mm², y una variación de los desplazamientos correspondientes a la tensión mínima y máxima, S_1 y S_2 , respectivamente. De esta forma el valor de C_{din} representa la pendiente de la recta establecida entre dos puntos que se describen:

- Punto máximo A, definido por el corte de las rectas tangentes a la curva que pasan por los valores de desplazamiento y fuerza máximos.
- Punto mínimo B, definido por el corte de las rectas tangentes a la curva que pasan por los valores de la fuerza y desplazamiento mínimos.

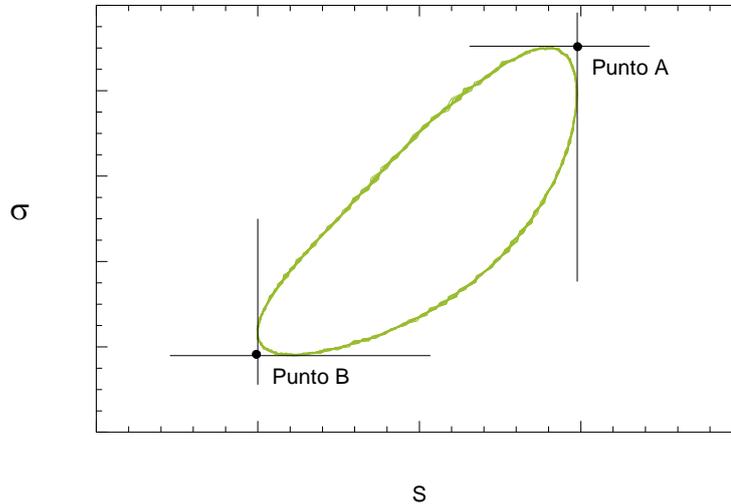


Figura 5-5 Representación gráfica del cálculo del módulo de rigidez dinámica C_{din}

5.1.3.2 Condiciones de ensayo e hipótesis adoptadas.

En el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares de ADIF se indican los siguientes parámetros de ensayo:

PARÁMETROS DE ENSAYO	VALOR
Módulo a determinar	$C_{din} (f_j)$ (N/mm ³) (módulo secante)
Tensión mínima σ_1	0.02 N/mm ²
Tensión máxima σ_2	0.10 N/mm ²
Curva carga/tiempo	Senoidal
Dimensiones de la muestra	300 x 300 mm ² x espesor
Frecuencias	1, 5, 10, 20 y 30 Hz sucesivamente
Superficies de carga	Placas de acero planas y desengrasadas con una rugosidad $R_a \geq 3,2$ según DIN 4766-2 y placa normalizada de balasto según DIN 45673-1.
Temperatura de ensayo	Temperatura ambiente (23±3)°C

Cantidad de muestras	3
----------------------	---

Tabla 5-2 Parámetros de ensayo para la determinación del módulo de rigidez dinámico C_{din}
(Fuente: ADIF)

5.1.3.2.1 Hipótesis adoptadas para la realización de los ensayos

El ensayo de rigidez dinámica se ha realizado cumpliendo con las especificaciones anteriores, excepto en cuanto a dimensiones de la muestra y cantidad de muestras por los mismos motivos especificados para el ensayo de rigidez estática. Se ha dado el valor de C_{din} con unidades $\frac{N}{mm}$ en vez de $\frac{N}{mm^3}$, de igual forma que en la rigidez estática.

- Por otro lado, no se han realizado los ensayos a las 5 frecuencias requeridas, sino que se ha realizado un único ensayo a 5 Hz. Esta decisión es en base a la aplicación que tiene el material a ensayar, su ubicación como pavimento de seguridad en parques infantiles, no como manta antivibratoria para disipar la energía al paso de los trenes. Por ello cabe esperar que la parte dinámica de este pavimento no es especialmente importante, por lo que se ha decidido reducir el número de ensayos.

5.1.3.3 Equipo empleado.

Se ha utilizado el mismo equipamiento que en el ensayo de rigidez estática:

- Máquina servo-hidráulica universal de ensayos
- Cuatro captadores de desplazamiento LVDT, con registro de salida continua, en cada una de las esquinas del sistema manta – placas.

5.2 MUESTRAS.

Para la realización del Trabajo Fin de Máster se han utilizado diferentes muestras, todas ellas suministradas por un mismo fabricante, Vulgalia, S.L.

Se disponen de tres granulometrías diferentes de SBR, con tamaños de grano entre 0.5 y 2.5 mm, entre 1 y 4 mm, y entre 2 y 7 mm, las cuales se han combinado de diferentes formas para obtener las muestras que se han empleado.

Las muestras empleadas son probetas cuadradas de caucho continuo, variando la granulometría de los granos de SBR y/o los espesores. La fabricación de las muestras se ha dividido en dos fases.

5.2.1 FASE 1

En esta primera fase se han fabricado ocho muestras de diferente tipología en cuanto a granulometría de la capa de SBR, todas ellas con el mismo espesor (40 mm) y con la misma capa superficial de EPDM.

La nomenclatura de las muestras sigue el orden alfabético desde la letra A hasta la G, de manera que cada letra corresponde a una muestra con diferentes características en la capa inferior.

Nota: A lo largo del trabajo, las muestras de la fase 1 también se han denominado con la misma letra, y acompañados del número 4, que hace referencia a su espesor en centímetros. Por lo tanto, la muestra A es equivalente a la muestra A-4, y así sucesivamente.

A continuación, se describe cada una de las muestras.

5.2.1.1 Muestra A

Muestra de pavimento de caucho continuo de dimensiones 500 X 500 mm y 40 mm de espesor. Está formada por una capa superior de 10 mm de EPDM color verde óxido al 18% de resina y por una capa inferior de 30 mm de SBR color negro al 15% de resina, con un tamaño de grano de caucho entre 2 y 7 mm.



Ilustración 5-6 Muestra A. Planta y sección (Fuente: elaboración propia)

MUESTRA A	
Tipología	Pavimento de caucho continuo
Dimensiones (mm)	500 X 500
Espesor (mm)	40
Capa superior	10 mm de EPDM color verde óxido al 18% de resina.
Capa inferior	30 mm de SBR color negro al 15% de resina.
Granulometría (mm)	2-7

Tabla 5-3 Características Muestra A (Fuente: elaboración propia)

5.2.1.2 Muestra B

Muestra de pavimento de caucho continuo de dimensiones 500 X 500 mm y 40 mm de espesor. Está formada por una capa superior de 10 mm de EPDM color verde óxido al 18% de resina y por una capa inferior de 30 mm de SBR color negro al 15% de resina, con un tamaño de grano de caucho entre 1 y 4 mm.

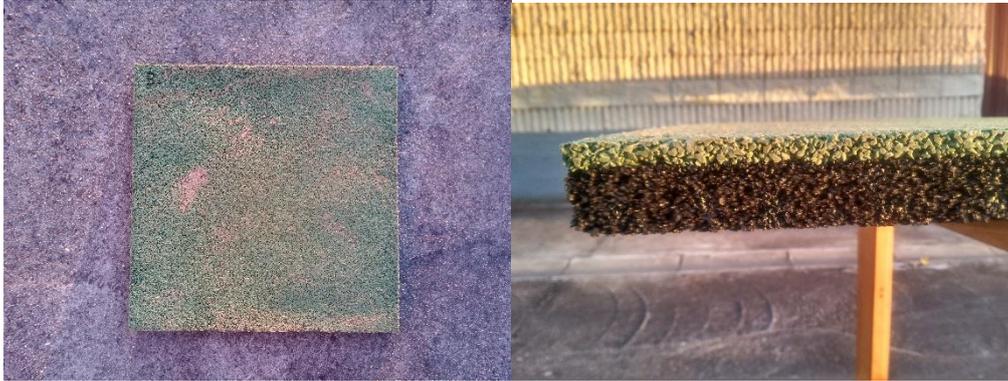


Ilustración 5-7 Muestra B. Planta y sección (Fuente: elaboración propia)

Nota: En la imagen se observan manchas en la superficie ya que durante el transporte estuvo en contacto con la muestra E que contiene paja.

MUESTRA B	
Tipología	Pavimento de caucho continuo
Dimensiones (mm)	500 X 500
Espesor (mm)	40
Capa superior	10 mm de EPDM color verde óxido al 18% de resina.
Capa inferior	30 mm de SBR color negro al 15% de resina.
Granulometría (mm)	1-4

Tabla 5-4 Características Muestra B (Fuente: elaboración propia)

5.2.1.3 Muestra C

Muestra de pavimento de caucho continuo de dimensiones 500 X 500 mm y 40 mm de espesor. Está formada por una capa superior de 10 mm de EPDM color verde óxido al 18% de resina y por una capa inferior de 30 mm de SBR color negro al 15% de resina, con un tamaño de grano de caucho entre 0.5 y 2.5 mm.



Ilustración 5-8 Muestra C. Planta y sección (Fuente: elaboración propia)

MUESTRA C	
Tipología	Pavimento de caucho continuo
Dimensiones (mm)	500 X 500
Espesor (mm)	40
Capa superior	10 mm de EPDM color verde óxido al 18% de resina.
Capa inferior	30 mm de SBR color negro al 15% de resina.
Granulometría (mm)	0.5-2.5

Tabla 5-5 Características Muestra C (Fuente: elaboración propia)

5.2.1.4 Muestra D

Muestra de pavimento de caucho continuo de dimensiones 500 X 500 mm y 40 mm de espesor. Está formada por una capa superior de 10 mm de EPDM color verde óxido al 18% de resina y por una capa inferior de 30 mm de SBR color negro al 15% de resina, formado a partes iguales por las granulometrías 2-7 mm y 1-4 mm.

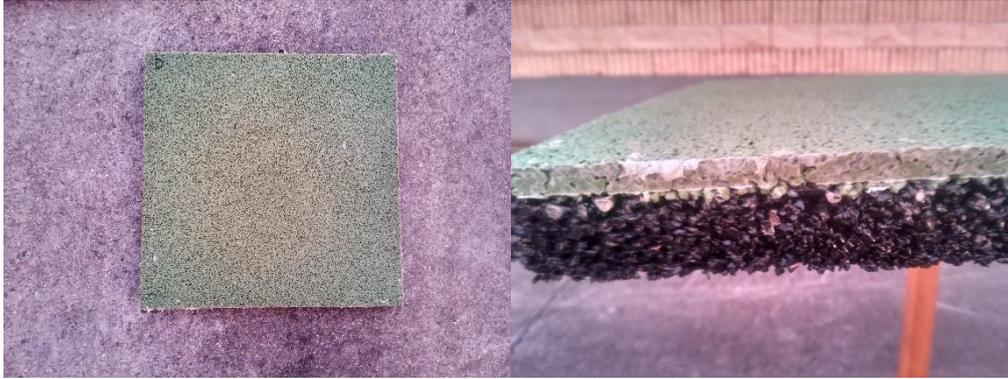


Ilustración 5-9 Muestra C. Planta y sección (Fuente: elaboración propia)

MUESTRA D	
Tipología	Pavimento de caucho continuo
Dimensiones (mm)	500 X 500
Espesor (mm)	40
Capa superior	10 mm de EPDM color verde óxido al 18% de resina.
Capa inferior	30 mm de SBR color negro al 15% de resina.
Granulometría (mm)	2-7 y 1-4 (a partes iguales)

Tabla 5-6 Características Muestra D (Fuente: elaboración propia)

5.2.1.5 Muestra E

Muestra de pavimento de caucho continuo de dimensiones 500 X 500 mm y 40 mm de espesor. Está formada por una capa superior de 10 mm de EPDM color verde óxido al 18% de resina y por una capa inferior de 30 mm de SBR color negro al 15% de resina, con un tamaño de grano de caucho entre 0.5 y 2.5 mm, al que además se le ha añadido un parte de paja.



Ilustración 5-10 Muestra D. Planta y sección (Fuente: elaboración propia)

Nota: en la siguiente imagen se puede observar que la capa inferior no es negra, si no que se nota el color marrón de la paja.



Ilustración 5-11 Muestra D. Detalle parte posterior (Fuente: elaboración propia)

Tabla 5-7 Características Muestra E (Fuente: elaboración propia)

MUESTRA E	
Tipología	Pavimento de caucho continuo
Dimensiones (mm)	500 X 500
Espesor (mm)	40
Capa superior	10 mm de EPDM color verde óxido al 18% de resina.
Capa inferior	30 mm de SBR color negro al 15% de resina.
Granulometría (mm)	0.5-2.5 + paja

5.2.1.6 Muestra F

Muestra de pavimento de loseta de caucho de dimensiones 500 X 500 mm y 40 mm de espesor. Está formada por una capa superior de 10 mm de EPDM color verde óxido al 18% de resina y por una capa inferior de 30 mm de SBR color negro al 15% de resina, con un tamaño de grano de caucho entre 2 y 7 mm, a la que se la ha dotado de unos ahorros de material.

En este caso, debido a que presenta ahorros en la parte inferior, este tipo de pavimento sólo puede prefabricarse mediante un molde en forma de loseta de caucho, que posteriormente puede ser puesto en obra junto con otras piezas iguales que encajen entre sí, formando una superficie embaldosada de caucho.



Ilustración 5-12 Muestra F. Planta y sección (Fuente: elaboración propia)

Nota: se puede observar que la capa inferior presenta aligeramientos con una geometría definida.



Ilustración 5-13 Muestra F. Detalle parte posterior (Fuente: elaboración propia)

MUESTRA F	
Tipología	Pavimento de loseta de caucho
Dimensiones (mm)	500 X 500
Espesor (mm)	40
Capa superior	10 mm de EPDM color verde óxido al 18% de resina.
Capa inferior	30 mm de SBR color negro al 15% de resina.
Granulometría (mm)	2-7 + ahorros

Tabla 5-8 Características Muestra F (Fuente: elaboración propia)

5.2.1.7 Muestra G

Muestra de pavimento de caucho continuo de dimensiones 500 X 500 mm y 40 mm de espesor. Está formada por una capa superior de 10 mm de EPDM color verde óxido al 18% de resina y por una capa inferior de 30 mm de SBR color negro al 15% de resina, para la que se han utilizado las tres granulometrías disponibles a partes iguales.



Ilustración 5-14 Muestra G. Planta y sección (Fuente: elaboración propia)

MUESTRA G	
Tipología	Pavimento de caucho continuo
Dimensiones (mm)	500 X 500
Espesor (mm)	40
Capa superior	10 mm de EPDM color verde óxido al 18% de resina.
Capa inferior	30 mm de SBR color negro al 15% de resina.

Granulometría (mm)	2-7, 1-4 y 0.5-2.5 (a partes iguales)
--------------------	---------------------------------------

Tabla 5-9 Características Muestra G (Fuente: elaboración propia)

5.2.1.8 Muestra H

Muestra de pavimento de caucho continuo de dimensiones 500 X 500 mm y 40 mm de espesor. Está formada por una capa superior de 10 mm de EPDM color verde óxido al 18% de resina y por una capa inferior de 30 mm de SBR color negro al 15% de resina, formado a partes iguales por las granulometrías 1-4 mm Y 0.5-2.5 mm.



Ilustración 5-15 Muestra H. Planta y sección (Fuente: elaboración propia)

MUESTRA G	
Tipología	Pavimento de caucho continuo
Dimensiones (mm)	500 X 500
Espesor (mm)	40
Capa superior	10 mm de EPDM color verde óxido al 18% de resina.
Capa inferior	30 mm de SBR color negro al 15% de resina.
Granulometría (mm)	1-4 y -0.5-2.5 (a partes iguales)

Tabla 5-10 Características Muestra H (Fuente: elaboración propia)

5.2.1.9 Resumen de muestras Fase 1.

Muestra	Capa inferior 30 mm de SBR al 15 % de resina	Capa inferior EPDM	Espesor (mm)
A	2 – 7 mm	18 % resina	40
B	1 – 4 mm	18 % resina	40
C	0.5 – 2.5 mm	18 % resina	40
D	2 – 7 mm + 1 – 4 mm (a partes iguales)	18 % resina	40
E	0.5 – 2.5 mm + paja	18 % resina	40
F	2 – 7 mm con ahorros	18 % resina	40
G	2 – 7 mm + 1 – 4 mm + 0.5 – 2.5 mm (a partes iguales)	18 % resina	40
H	1 – 4 mm + 0.5 – 2.5 mm (a partes iguales)	18 % resina	40

Tabla 5-11 Resumen de las características de las muestras de la fase 1 (Fuente: elaboración propia)



5.2.2 FASE 2

Una vez analizadas las muestras de la primera fase, se escogieron los tres tipos de muestras que mejor comportamiento registraron respecto a la amortiguación frente a impactos.

Se eligieron las muestras A, B y C, de las cuales se fabricaron tres muestras por cada tipología, de 6, 8 y 10 centímetros y se continuó con el proceso de estudio. Se mantiene en todas las muestras la misma capa superficial de 1 cm de EPDM, en este caso de color morado, y lo mismos porcentajes en peso de resina.

Nota: Para esta elección no se tuvo en cuenta la muestra F, ya que dicha muestra es de tipo loseta prefabricada, y los resultados de altura de caída crítica probablemente sean inferiores a los obtenidos en este trabajo, ya que para ensayar adecuadamente este tipo de pavimentos hay que contar con cuatro muestras que se disponen tal como quedarían instaladas, y se realiza el ensayo en nueve puntos, cinco de los cuales se encuentran en las uniones entre las losas.

A continuación, se describe cada una de las muestras, según su tipología.

La nomenclatura de las muestras correspondientes a la fase 2, lleva en primer lugar una letra, que va asociado a la tipología de muestra de acuerdo a la fase 1, y en segundo lugar un número que hace referencia al espesor total de la muestra en centímetros. A modo de ejemplo, la muestra A-6, se corresponde a una muestra con las características de la muestra A, y que cuenta con un espesor de 6 cm (60 mm).

5.2.2.1 Muestras Tipo A

Muestra de pavimento de caucho continuo de dimensiones 500 X 500 mm, de 60, 80 y 100 mm de espesor. Está formada por una capa superior de 10 mm de EPDM color morado óxido al 18% de resina y por una capa inferior de espesor variable de SBR color negro al 15% de resina, con un tamaño de grano de caucho entre 2 y 7 mm.

MUESTRAS TIPO A		
TIPOLOGÍA	Pavimento de caucho continuo	
DIMENSIONES	500 X 500	
GRANULOMETRÍA	2 - 7	
CAPA SUPERIOR	10 mm de EPDM color morado óxido al 18% de resina.	
TIPO	CAPA INFERIOR	ESPESOR
A-6	50 mm de SBR color negro al 15% de resina	60

A-8	70 mm de SBR color negro al 15% de resina	80
A-10	90 mm de SBR color negro al 15% de resina	100

Tabla 5-12 Características Muestras Tipo A (Fuente: elaboración propia)

Muestra A-6



Ilustración 5-16 Muestra A-6. Planta y sección (Fuente: elaboración propia)

Muestra A-8



Ilustración 5-17 Muestra A-8. Planta y sección (Fuente: elaboración propia)

Muestra A-10



Ilustración 5-18 Muestra A-10. Planta y sección (Fuente: elaboración propia)

5.2.2.2 Muestras Tipo B

Muestra de pavimento de caucho continuo de dimensiones 500 X 500 mm y 60,80 y 100 mm de espesor. Está formada por una capa superior de 10 mm de EPDM color morado óxido al 18% de resina y por una capa inferior de espesor variable de SBR color negro al 15% de resina, con un tamaño de grano de caucho entre 1 y 4 mm.

MUESTRAS TIPO B		
TIPOLOGÍA	Pavimento de caucho continuo	
DIMENSIONES	500 X 500	
GRANULOMETRÍA	1 - 4	
CAPA SUPERIOR	10 mm de EPDM color morado óxido al 18% de resina.	
TIPO	CAPA INFERIOR	ESPESOR
B-6	50 mm de SBR color negro al 15% de resina	60
B-8	70 mm de SBR color negro al 15% de resina	80
B-10	90 mm de SBR color negro al 15% de resina	100

Tabla 5-13 Características Muestras Tipo B (Fuente: elaboración propia)

Muestra B-6

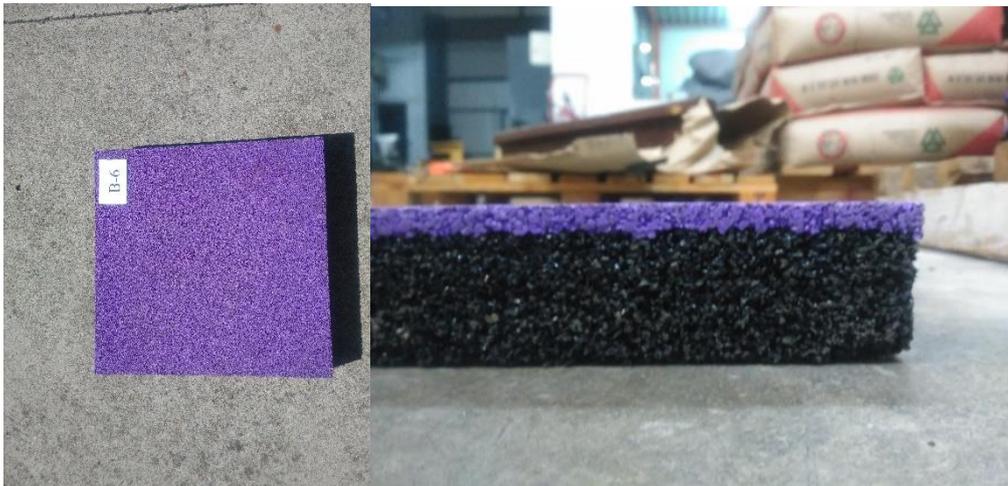


Ilustración 5-19 Muestra B-6. Planta y sección (Fuente: elaboración propia)

Muestra B-8

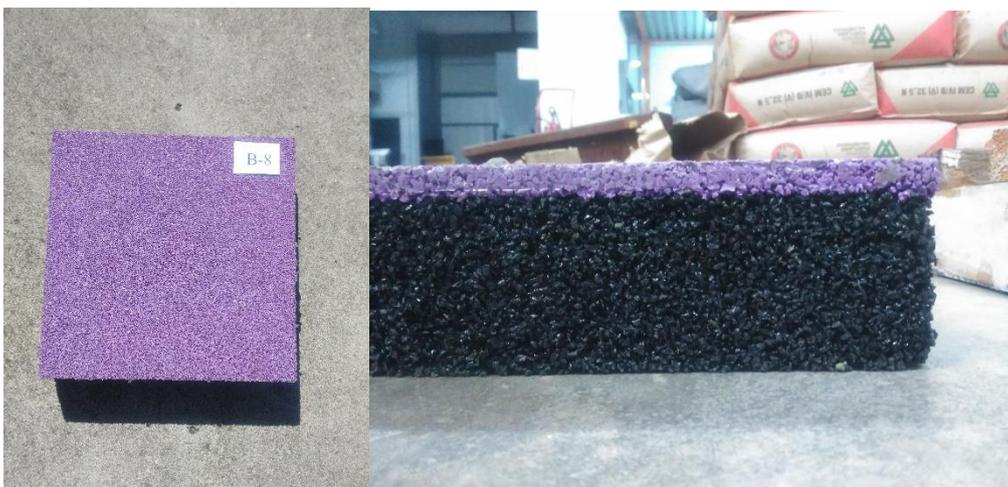


Ilustración 5-20 Muestra B-8. Planta y sección (Fuente: elaboración propia)

Muestra B-10



Ilustración 5-21 Muestra B-10. Planta y sección (Fuente: elaboración propia)

5.2.2.3 Muestras Tipo C

Muestra de pavimento de caucho continuo de dimensiones 500 X 500 mm y 60, 80 y 100 mm de espesor. Está formada por una capa superior de 10 mm de EPDM color morado óxido al 18% de resina y por una capa inferior de espesor variable de SBR color negro al 15% de resina, con un tamaño de grano de caucho entre 0.5 y 2.5 mm.

MUESTRAS TIPO C		
TIPOLOGÍA	Pavimento de caucho continuo	
DIMENSIONES	500 X 500	
GRANULOMETRÍA	0.5 – 2.5	
CAPA SUPERIOR	10 mm de EPDM color morado óxido al 18% de resina.	
TIPO	CAPA INFERIOR	ESPESOR
C-6	50 mm de SBR color negro al 15% de resina	60
C-8	70 mm de SBR color negro al 15% de resina	80
C-10	90 mm de SBR color negro al 15% de resina	100

Tabla 5-14 Características Muestras Tipo C (Fuente: elaboración propia)

Muestra C-6



Ilustración 5-22 Muestra C-6. Planta y sección (Fuente: elaboración propia)

Muestra C-8



Ilustración 5-23 Muestra C-8. Planta y sección (Fuente: elaboración propia)

Muestra C-10

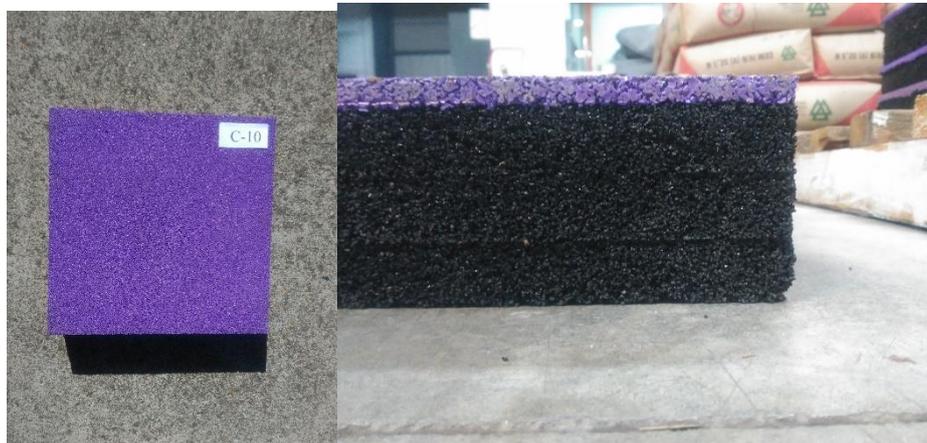


Ilustración 5-24 Muestra C-10. Planta y sección (Fuente: elaboración propia)

5.3 SISTEMÁTICA OPERATIVA

Se ha dividido la fase experimental en dos fases:

5.3.1 FASE 1

Una primera fase inicial en la que se fabricaron ocho probetas de caucho continuo con el mismo espesor, según las sugerencias del fabricante. Se decide realizar el proyecto con muestras cuadradas de 50 cm de lado bicapas; una capa superficial de 10 mm de EPDM y misma dosificación de resina para todas las muestras, y otra capa de 30 mm de caucho revalorizado SBR, que varía entre las diferentes muestras.

Se emplea como variable principal en seis de las probetas el empleo de diferentes granulometrías del SBR, de manera que la segunda capa de las muestras queda compuesta por simplemente un tipo de granulometría, o una combinación de estas en las mismas proporciones.

En otra muestra se decide añadir paja para observar su comportamiento, mientras que en la última se realizan unos ahorros de material, de manera que su uso se limitaría al de losa de caucho prefabricada.

Una vez fabricadas las muestras, se envían a laboratorio para realizar los ensayos correspondientes según el apartado 5.1

En la primera fase se realizan en primera instancia los ensayos de determinación de la altura de caída crítica, al tener por seguro que no iban a ser ensayos destructivos, pudiendo utilizar las mismas muestras para el resto de ensayos. Se realizan tres ensayos de determinación de la altura de caída crítica.

Realizados los primeros ensayos, se envían al laboratorio de LADICIM para proceder a la realización de los ensayos de rigidez estática y rigidez dinámica.

Una vez realizados todos los ensayos y procesados los datos obtenidos para la obtención de los resultados, se realiza un primer análisis de estos. Se decide pasar a la segunda fase del trabajo, fabricando nuevas muestras para volver a ensayarlas.

5.3.2 FASE 2

Con los resultados de la primera fase en la mano, de acuerdo con las partes implicadas, se decide elegir las tres muestras con mejores resultados en los ensayos de determinación de la altura de caída crítica, es decir, las probetas que para un espesor de 40 mm han tenido un mejor comportamiento en cuanto al amortiguamiento, principal propiedad de cara a mantener unos buenos niveles de seguridad en los parques infantiles.

Elegidas las muestras A, B y C, se decide fabricar tres muestras más de cada tipología variando únicamente el espesor, confeccionando probetas de caucho continuo de 60, 80 y 100 mm.



De esta forma la segunda y última fase del trabajo cuenta con nueve prototipos más, a los cuales se decide aplicar los ensayos de determinación de altura de caída crítica y rigidez estática.

No se realizan los ensayos de rigidez dinámica ya que se ha observado en la primera fase que sus resultados no aportan mucho al estudio, y requieren de importantes recursos para su realización.

Se realizan en primer lugar los ensayos de determinación de la altura de caída crítica en laboratorio, ensayando tres puntos por cada muestra, y posteriormente, se ensayan a rigidez estática las nueve muestras de caucho continuo.

Se procesan los datos conseguidos en gabinete, de manera que se obtienen los resultados, pasando a la fase de análisis.

6 RESULTADOS

En el presente apartado se presentan los resultados obtenidos en cada muestra de los diferentes ensayos realizados en las dos fases del proyecto.

En primer lugar, se explica brevemente cómo se obtienen los resultados de los ensayos, y finalmente se presenta la relación de resultados para cada muestra.

6.1 ALTURA DE CAÍDA CRÍTICA.

La altura de caída crítica representa la altura con la que se alcanza un valor de HIC igual a 1000, es decir, el valor fijado por normativa para el cual existe un 3% de probabilidad de sufrir una lesión crítica en la cabeza.

La altura de caída crítica se obtiene mediante la interpolación de los datos obtenidos a cuatro alturas diferentes, obteniendo la altura de caída para un valor 1000 de HIC.

Se indican los resultados obtenidos para cada muestra, pudiéndose observar el valor del HIC para cada impacto realizado, al igual que las gráficas que genera el software de cálculo para interpolar el resultado. Se ha considerado el resultado medio de la altura de caída crítica para cada muestra, medido en metros.

6.2 MÓDULO DE RIGIDEZ ESTÁTICA C_{EST} .

El módulo de rigidez estática representa la fuerza de compresión aplicada sobre la muestra elastomérica frente a la correspondiente deformación de esta registrada por el valor medio de los cuatro comparadores LDVT. En la siguiente figura se representa el esquema de una gráfica de rigidez estática.

La rigidez estática C_{est} se calcula como la relación entre el incremento de la fuerza y la variación de la deformación, calculándose de acuerdo a la siguiente expresión:

$$C_{est} = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n}}{S_{m\acute{a}x} - S_{m\acute{i}n}} = \frac{\Delta F}{\Delta \delta} \cdot \frac{l}{S} \left(\frac{N}{mm^3} \right)$$

Los resultados de las rigideces estáticas de las muestras ensayadas en las dos fases, se han determinado entre los valores de tensión 0,02 N/mm² y 0,1 N/mm².

Los resultados se han expresado en KN/mm, no considerando el área sobre el que se aplica la carga.

En la siguiente figura se puede observar cómo se realiza el cálculo gráficamente.

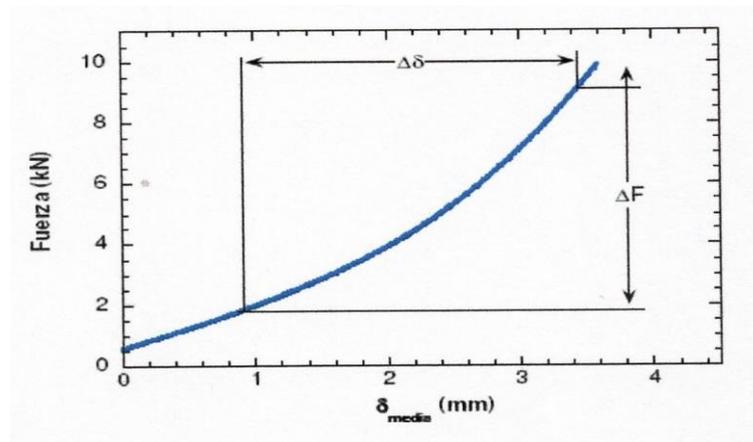


Figura 6-1 Representación gráfica del cálculo de la rigidez estática

Se realizan tres ciclos de cargas, valorando la rigidez estática del último ciclo. Esto significa que se toman los datos de carga y deformaciones del último ciclo, representándolos en sus correspondientes gráficas y calculando el módulo de rigidez estática C_{est} .

Los resultados se encuentran presentados para cada muestra.

6.3 MÓDULO DE RIGIDEZ DINÁMICA C_{din}

La rigidez dinámica se calcula de acuerdo a la siguiente formulación:

$$C_{din} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{S_2 - S_1} \left(\frac{N}{mm^3} \right)$$

El módulo de rigidez dinámica se calcula como la división entre una variación de tensión aplicada mínima σ_1 de 0,02 N/mm² y máxima σ_2 de 0,10 N/mm², y una variación de los desplazamientos correspondientes a la tensión mínima y máxima, S_1 y S_2 , respectivamente. De esta forma el valor de C_{din} representa la pendiente de la recta establecida entre dos puntos que se describen:

- Punto máximo A:
Queda definido por el corte de las rectas tangentes a la curva que pasan por los valores máximos de desplazamiento y fuerza.
- Punto mínimo B:
Se define mediante el corte de las rectas tangentes a la curva que pasan por los valores mínimos de la fuerza y desplazamiento.

En la siguiente figura se muestra un croquis de cómo se obtienen gráficamente los puntos A y B empleados para el cálculo de la rigidez dinámica.

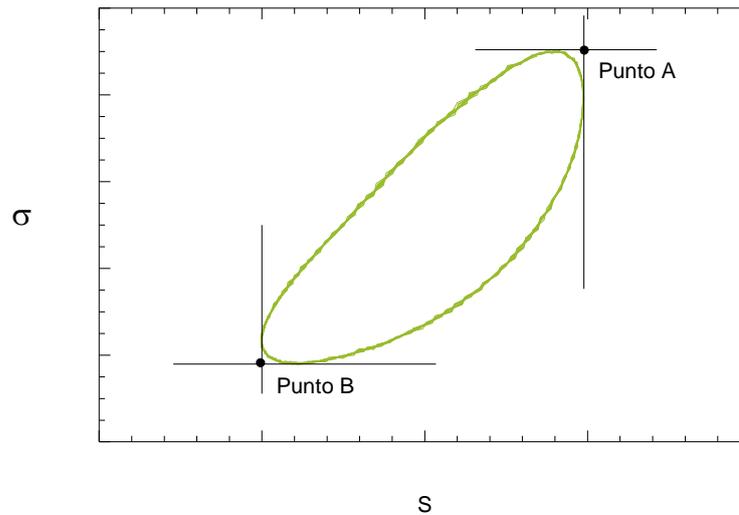


Figura 6-2 Representación gráfica del cálculo del módulo de rigidez dinámica C_{din}

Este ensayo se ha realizado únicamente en la fase 1 del trabajo, por lo que sólo aparecerá su resultado en las muestras de dicha fase.

Al igual que la rigidez estática, los resultados se han expresado en KN/mm, no considerando el área sobre el que se aplica la carga.

6.4 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS POR FASES

A continuación, se recoge los resultados obtenidos de cada ensayo para cada muestra. Este apartado se divide por de acuerdo a las dos fases realizadas.

6.4.1 RESULTADOS FASE 1

En la primera fase se han realizado ensayos de determinación de la altura de caída crítica, de rigidez estática y dinámica.

Adicionalmente, estas muestras se han pesado mediante báscula, recogiendo la masa en kg de cada probeta.

Para cada rigidez se adjunta la gráfica obtenida con los datos que representa la carga frente al desplazamiento de la muestra.

A continuación, se presentan los resultados de todos los ensayos realizados atendiendo a cada muestra.

6.4.1.1 Muestra A

6.4.1.1.1 Altura de caída crítica

En la tabla se muestran los resultados del ensayo de determinación de la altura de caída crítica en el punto medio de la muestra A.

Muestra A-4			
Punto	Altura (m)	HIC	Altura de Caída Crítica (m)
1	0,94	549	1,34
	1,11	725	
	1,39	1075	
	1,61	1344	
2	0,91	430	1,31
	1,11	750	
	1,46	1200	
	1,72	1635	
3	1	650	1,26
	1,17	892	
	1,41	1205	
	1,66	1618	

Tabla 6-1 Resultado ensayo determinación de la altura de caída crítica por puntos. Muestra A (Fuente: Sanpe ingeniería)

A continuación, se muestran las curvas Altura de caída libre – HIC de cada uno de los tres puntos ensayados en la muestra A-4.



Figura 6-3 Altura de caída - HIC en puntos 1, 2 y 3. Muestra A (Fuente: Sanpe Ingeniería)

El resultado obtenido para la muestra A se toma como la media de la altura de caída crítica de los tres ensayos realizados en este punto: 1.30 m

6.4.1.1.2 Módulo de rigidez estático C_{est}

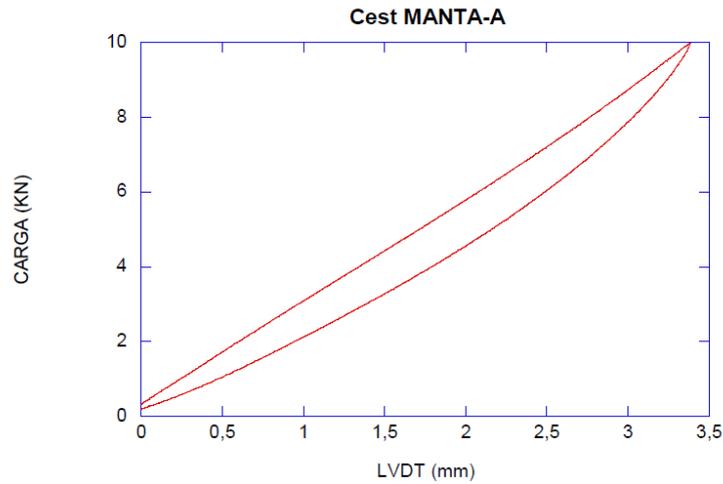


Figura 6-4. Curva carga – desplazamiento medio Cest Muestra A (Fuente: LADICIM)

6.4.1.1.3 Módulo de rigidez dinámico C_{din}

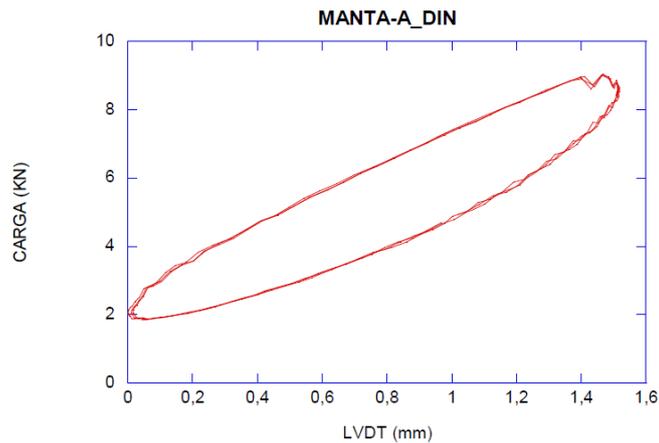


Figura 6-5 Curva carga – desplazamiento medio C_{din} Muestra A (Fuente: LADICIM)

6.4.1.1.4 Resultados muestra A

Muestra A	
Altura de caída crítica (m)	1.30
Módulo de rigidez estático (KN/mm)	2.82
Módulo de rigidez dinámico (KN/mm)	4.74
Masa (kg)	7.08

Tabla 6-2 Resultados muestra A (Fuente: elaboración propia)

6.4.1.2 Muestra B

6.4.1.2.1 Altura de caída crítica

En la tabla se muestran los resultados del ensayo de determinación de la altura de caída crítica en el punto medio de la muestra B.

Muestra B-4			
Punto	Altura (m)	HIC	Altura de Caída Crítica (m)
1	1,01	688	1,30
	1,16	829	
	1,48	160	
	1,75	238	
2	1,06	619	1,34
	1,23	858	
	1,50	1214	
	1,62	1344	
3	0,88	401	1,36
	1,16	751	
	1,41	1076	
	1,76	1565	

Tabla 6-3 Resultado ensayo determinación de la altura de caída crítica por puntos. Muestra B (Fuente: Sanpe ingeniería)

A continuación, se muestran las curvas Altura de caída libre – HIC de cada uno de los tres puntos ensayados en la muestra B-4

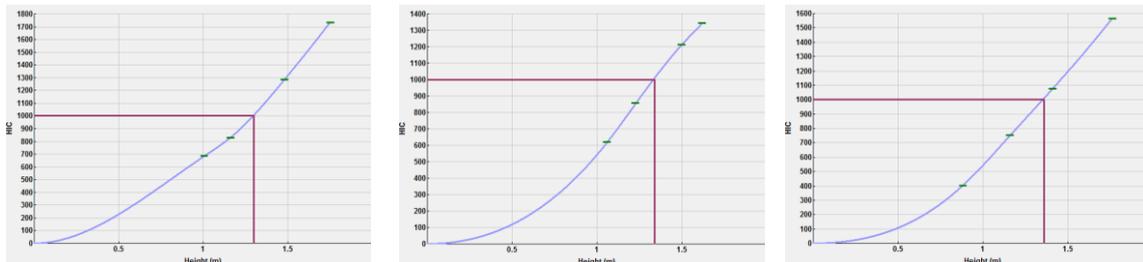


Figura 6-6 Altura de caída - HIC en puntos 1, 2 y 3. Muestra B (Fuente: Sanpe Ingeniería)

El resultado obtenido para la muestra B se toma como la media de la altura de caída crítica de los tres ensayos realizados en este punto: 1.33 m

6.4.1.2.2 Módulo de rigidez estático C_{est}

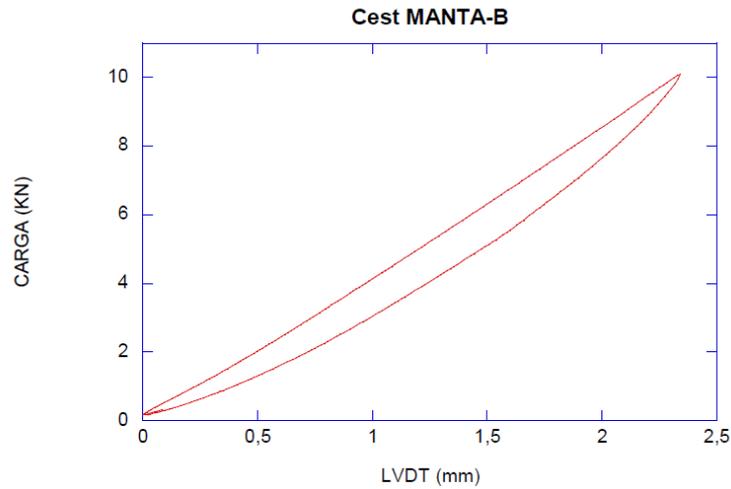


Figura 6-7 Curva carga – desplazamiento medio Cest Muestra B (Fuente: LADICIM)

6.4.1.2.3 Módulo de rigidez dinámico C_{din}

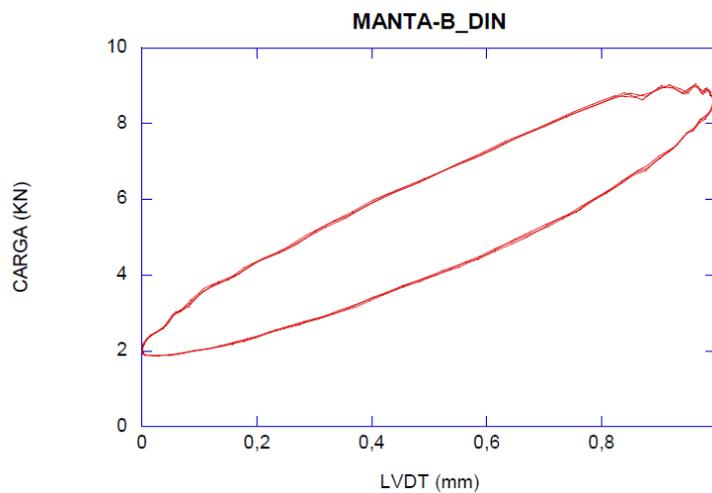


Figura 6-8 Curva carga – desplazamiento medio C_{din} Muestra B (Fuente: LADICIM)

6.4.1.2.4 Resultados muestra B

Muestra B	
Altura de caída crítica (m)	1.33
Módulo de rigidez estático (KN/mm)	4.34
Módulo de rigidez dinámico (KN/mm)	7.24
Masa (kg)	7.24

Tabla 6-4 Resultados muestra B (Fuente: elaboración propia)

6.4.1.3 Muestra C

6.4.1.3.1 Altura de caída crítica

En la tabla se muestran los resultados del ensayo de determinación de la altura de caída crítica en el punto medio de la muestra C.

Muestra C-4			
Punto	Altura (m)	HIC	Altura de Caída Crítica (m)
1	0,87	470	1,35
	1,13	651	
	1,46	1223	
	1,65	1537	
2	0,87	528	1,32
	1,17	774	
	1,40	1160	
	1,61	1536	
3	0,86	436	1,35
	1,20	749	
	1,53	1337	
	1,71	1619	

Tabla 6-5 Resultado ensayo determinación de la altura de caída crítica por puntos. Muestra C (Fuente: Sanpe ingeniería)

A continuación, se muestran las curvas Altura de caída libre – HIC de cada uno de los tres puntos ensayados en la muestra C-4

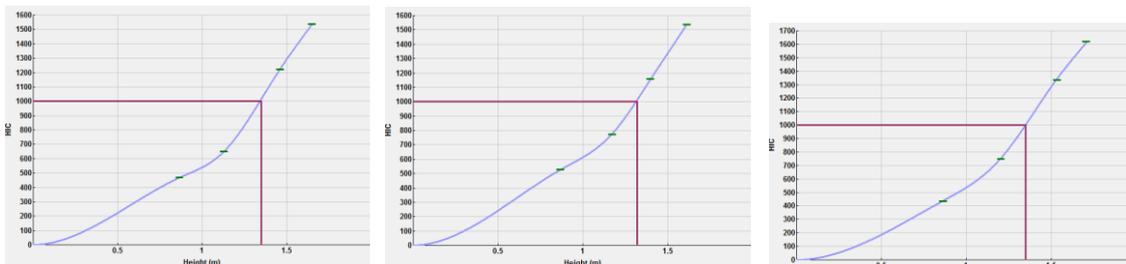


Figura 6-9 Altura de caída - HIC en puntos 1, 2 y 3. Muestra C (Fuente: Sanpe Ingeniería)

El resultado obtenido para la muestra C se toma como la media de la altura de caída crítica de los tres ensayos realizados en este punto: 1.34 m

6.4.1.3.2 Módulo de rigidez estático C_{est}

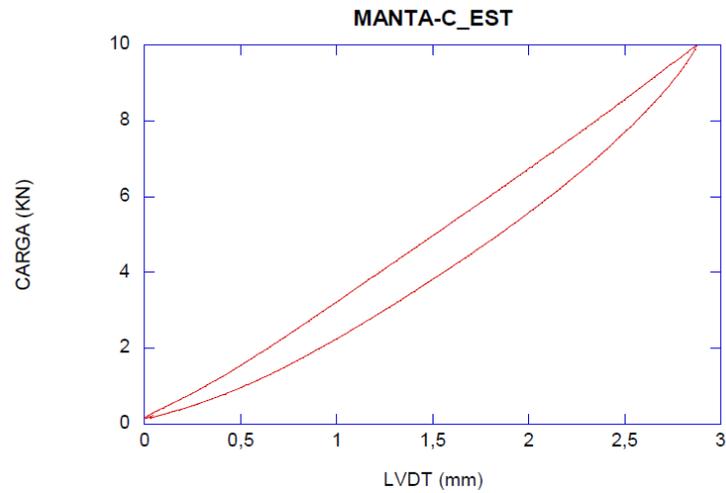


Figura 6-10 Curva carga – desplazamiento medio C_{est} Muestra C (Fuente: LADICIM)

6.4.1.3.3 Módulo de rigidez dinámico C_{din}

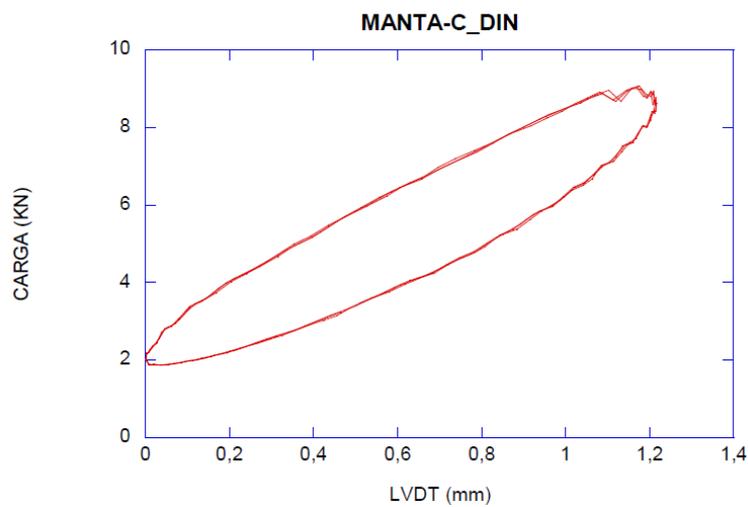


Figura 6-11 Curva carga – desplazamiento medio C_{din} Muestra C (Fuente: LADICIM)

6.4.1.3.4 Resultados muestra C

Muestra C	
Altura de caída crítica (m)	1.34
Módulo de rigidez estático (KN/mm)	3.53
Módulo de rigidez dinámico (KN/mm)	5.92
Masa (kg)	7.52

Tabla 6-6 Resultados muestra C (Fuente: elaboración propia)

6.4.1.4 Muestra D

6.4.1.4.1 Altura de caída crítica

En la tabla se muestran los resultados del ensayo de determinación de la altura de caída crítica en el punto medio de la muestra D.

Muestra D-4			
Punto	Altura (m)	HIC	Altura de Caída Crítica (m)
1	0,99	676	1,25
	1,16	894	
	1,40	1174	
	1,65	1414	
2	0,93	623	1,27
	1,20	932	
	1,45	1188	
	1,59	1388	
3	0,90	477	1,29
	1,00	578	
	1,58	1406	
	1,77	1538	

Tabla 6-7 Resultado ensayo determinación de la altura de caída crítica por puntos. Muestra D (Fuente: Sanpe ingeniería)

A continuación, se muestran las curvas Altura de caída libre – HIC de cada uno de los tres puntos ensayados en la muestra D-4

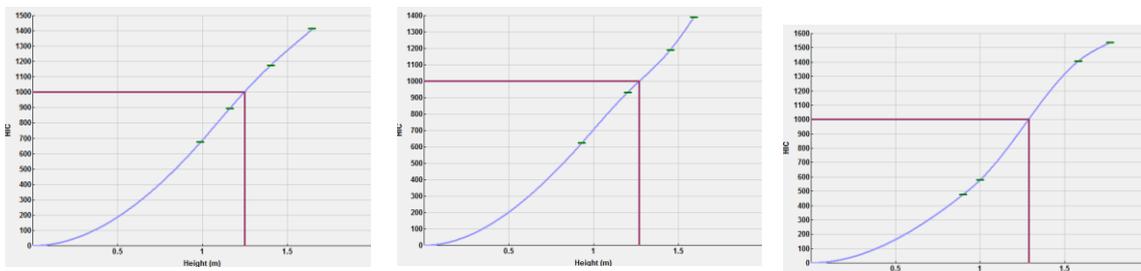


Figura 6-12 Altura de caída - HIC en puntos 1, 2 y 3. Muestra D (Fuente: Sanpe Ingeniería)

El resultado obtenido para la muestra D se toma como la media de la altura de caída crítica de los tres ensayos realizados en este punto: 1.27 m

6.4.1.4.2 Módulo de rigidez estático C_{est}

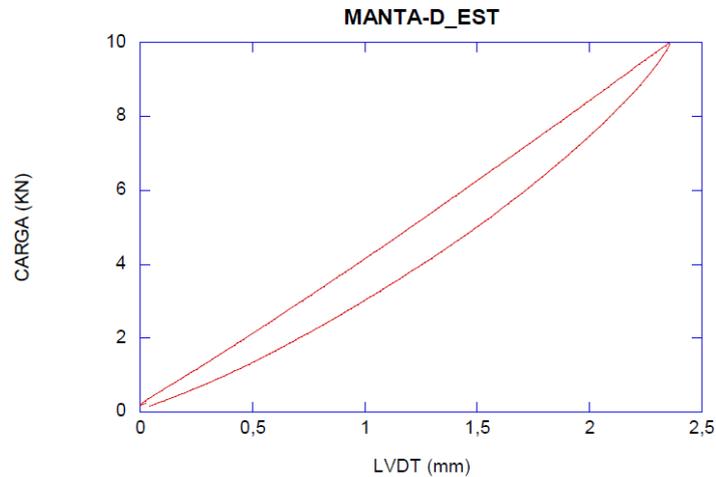


Figura 6-13 Curva carga – desplazamiento medio C_{est} Muestra D (Fuente: LADICIM)

6.4.1.4.3 Módulo de rigidez dinámico C_{din}

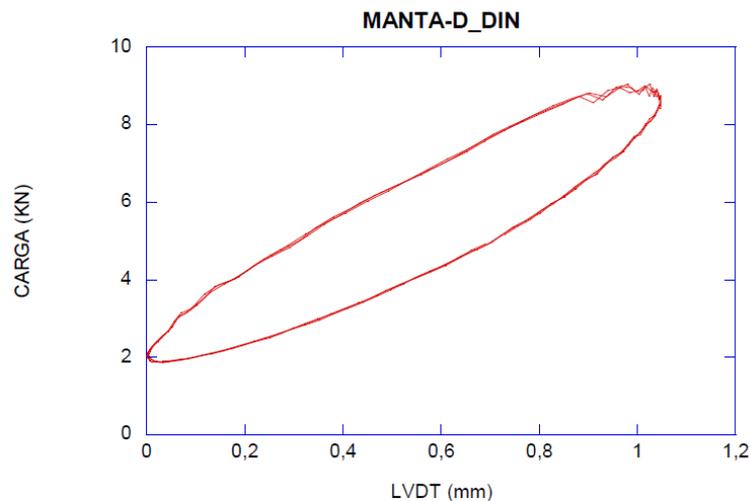


Figura 6-14 Curva carga – desplazamiento medio C_{din} Muestra D (Fuente: LADICIM)

6.4.1.4.4 Resultados muestra D

Muestra D	
Altura de caída crítica (m)	1.27
Módulo de rigidez estático (KN/mm)	4.20
Módulo de rigidez dinámico (KN/mm)	6.88
Masa (kg)	7.60

Tabla 6-8 Resultados muestra D (Fuente: elaboración propia)

6.4.1.5 Muestra E

6.4.1.5.1 Altura de caída crítica

En la tabla se muestran los resultados del ensayo de determinación de la altura de caída crítica en el punto medio de la muestra E.

Muestra E-4			
Punto	Altura (m)	HIC	Altura de Caída Crítica (m)
1	0,85	507	1,20
	1,06	794	
	1,27	1133	
	1,35	1278	
2	0,85	660	1,11
	1,03	845	
	1,19	1169	
	1,29	1299	
3	0,88	683	1,16
	1	875	
	1,22	1151	
	1,25	1261	

Tabla 6-9 Resultado ensayo determinación de la altura de caída crítica por puntos. Muestra E (Fuente: Sanpe ingeniería)

A continuación, se muestran las curvas Altura de caída libre – HIC de cada uno de los tres puntos ensayados en la muestra E-4

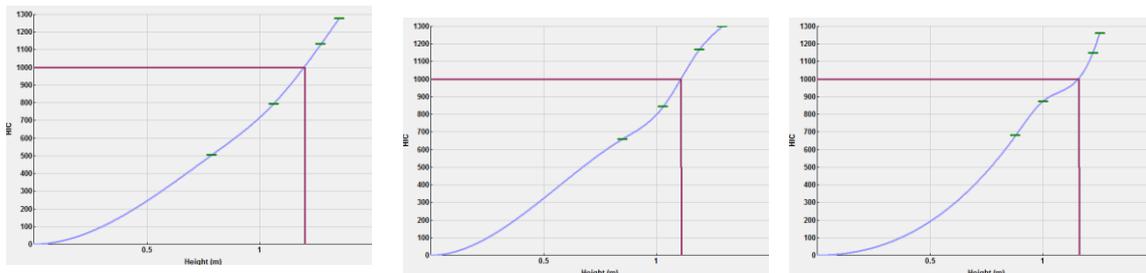


Figura 6-15 Altura de caída - HIC en puntos 1, 2 y 3. Muestra E (Fuente: Sanpe Ingeniería)

El resultado obtenido para la muestra E se toma como la media de la altura de caída crítica de los tres ensayos realizados en este punto: 1.16 m

6.4.1.5.2 Módulo de rigidez estático C_{est}

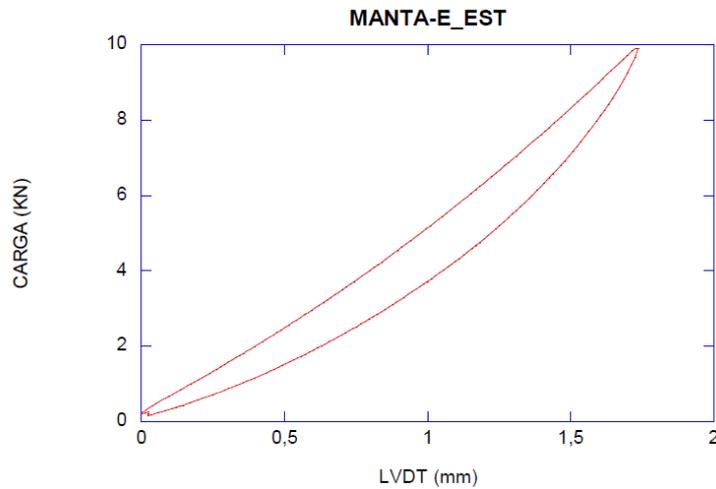


Figura 6-16 Curva carga – desplazamiento medio C_{est} Muestra E (Fuente: LADICIM)

6.4.1.5.3 Módulo de rigidez dinámico C_{din}

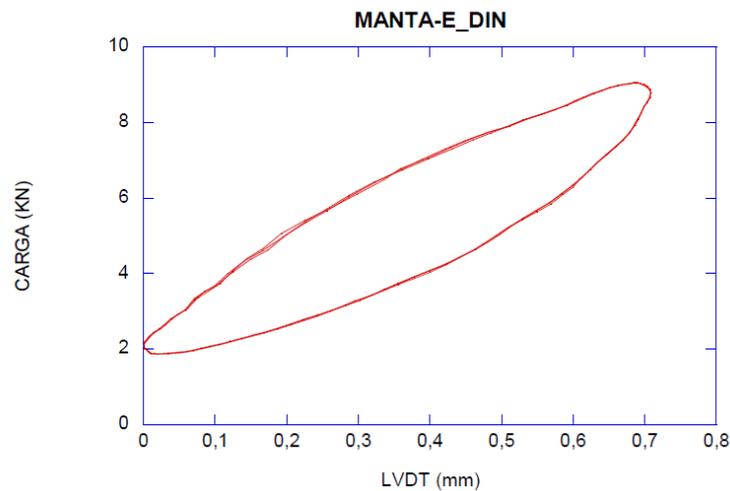


Figura 6-17 Curva carga – desplazamiento medio C_{din} Muestra E (Fuente: LADICIM)

6.4.1.5.4 Resultados muestra E

Muestra E	
Altura de caída crítica (m)	1.16
Módulo de rigidez estático (KN/mm)	5.79
Módulo de rigidez dinámico (KN/mm)	10.15
Masa (kg)	6.64

Tabla 6-10 Resultados muestra E (Fuente: elaboración propia)

6.4.1.6 Muestra F

6.4.1.6.1 Altura de caída crítica

En la tabla se muestran los resultados del ensayo de determinación de la altura de caída crítica en el punto medio de la muestra F.

Muestra F-4			
Punto	Altura (m)	HIC	Altura de Caída Crítica (m)
1	0,83	420	1,44
	1,20	783	
	1,57	1186	
	1,67	1370	
2	1,06	662	1,30
	1,19	849	
	1,45	1214	
	1,54	1361	
3	1,03	670	1,31
	1,21	880	
	1,42	1173	
	1,51	1311	

Tabla 6-11 Resultado ensayo determinación de la altura de caída crítica por puntos. Muestra F (Fuente: Sanpe ingeniería)

A continuación, se muestran las curvas Altura de caída libre – HIC de cada uno de los tres puntos ensayados en la muestra F-4

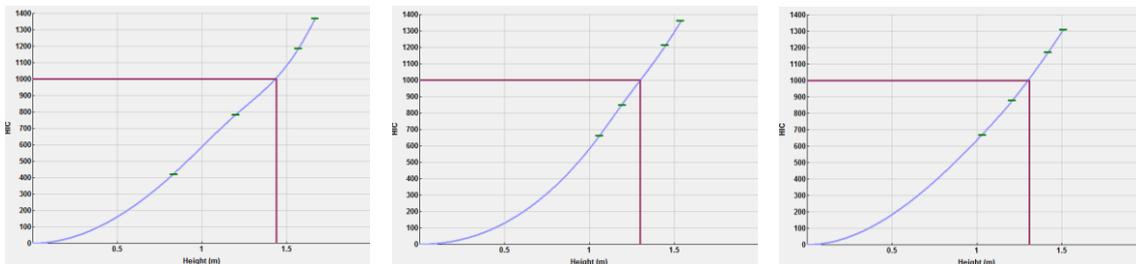


Figura 6-18 Altura de caída - HIC en puntos 1, 2 y 3. Muestra F (Fuente: Sanpe Ingeniería)

El resultado obtenido para la muestra F se toma como la media de la altura de caída crítica de los tres ensayos realizados en este punto: 1.35 m

6.4.1.6.2 Módulo de rigidez estático C_{est}

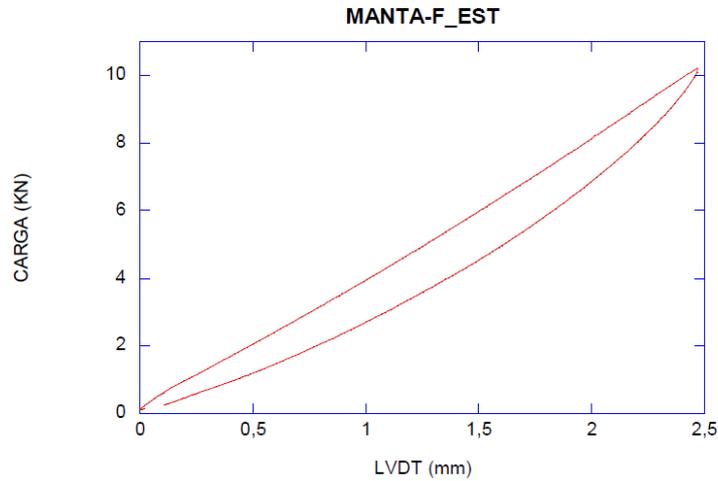


Figura 6-19 Curva carga – desplazamiento medio C_{est} Muestra F (Fuente: LADICIM)

6.4.1.6.3 Módulo de rigidez dinámico C_{din}

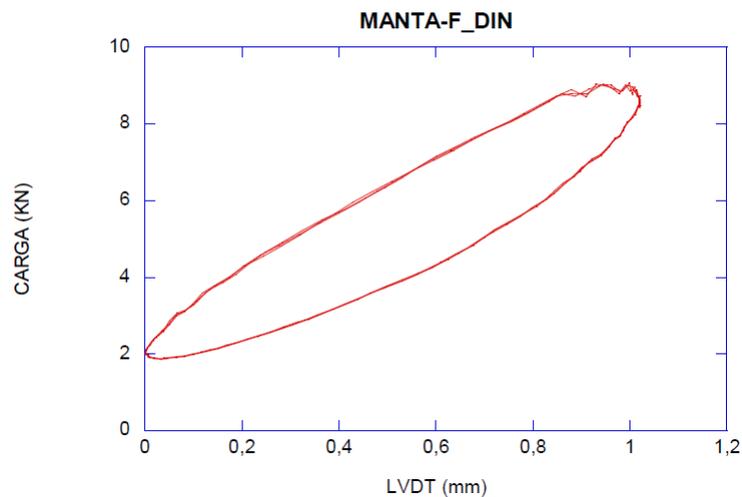


Figura 6-20 Curva carga – desplazamiento medio C_{din} Muestra F (Fuente: LADICIM)

6.4.1.6.4 Resultados muestra F

Muestra F	
Altura de caída crítica (m)	1.35
Módulo de rigidez estático (KN/mm)	4.08
Módulo de rigidez dinámico (KN/mm)	7.05
Masa (kg)	6.66

Tabla 6-12 Resultados muestra F (Fuente: elaboración propia)

6.4.1.7 Muestra G

6.4.1.7.1 Altura de caída crítica

En la tabla se muestran los resultados del ensayo de determinación de la altura de caída crítica en el punto medio de la muestra G.

Muestra G-4			
Punto	Altura (m)	HIC	Altura de Caída Crítica (m)
1	0,97	611	1,30
	1,18	840	
	1,48	1271	
	1,62	1472	
2	0,93	626	1,23
	1,14	882	
	1,44	1320	
	1,67	1656	
3	0,83	537	1,24
	1,09	821	
	1,39	1214	
	1,61	1607	

Tabla 6-13 Resultado ensayo determinación de la altura de caída crítica por puntos. Muestra G (Fuente: Sanpe ingeniería)

A continuación, se muestran las curvas Altura de caída libre – HIC de cada uno de los tres puntos ensayados en la muestra G-4

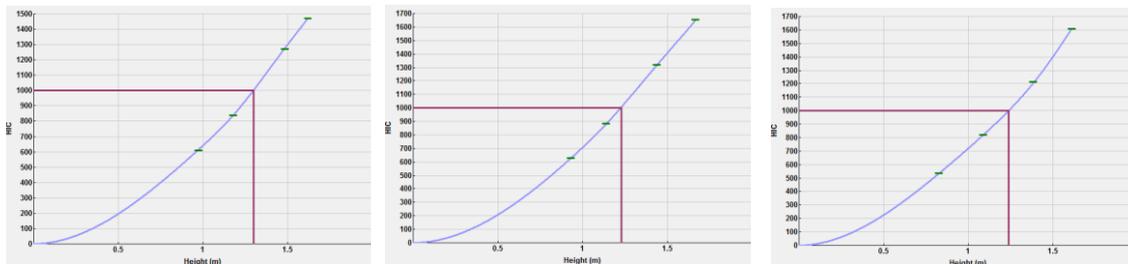


Figura 6-21 Altura de caída - HIC en puntos 1, 2 y 3. Muestra G (Fuente: Sanpe Ingeniería)

El resultado obtenido para la muestra G se toma como la media de la altura de caída crítica de los tres ensayos realizados en este punto: 1.26 m

6.4.1.7.2 Módulo de rigidez estático C_{est}

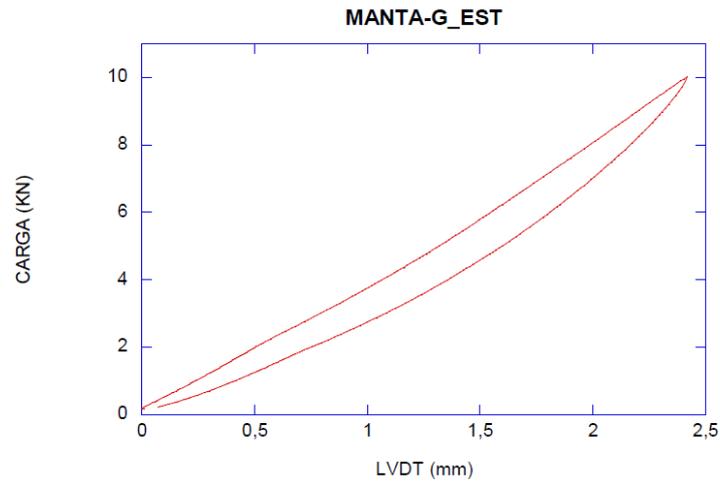


Figura 6-22 Curva carga – desplazamiento medio C_{est} Muestra C (Fuente: LADICIM)

6.4.1.7.3 Módulo de rigidez dinámico C_{din}

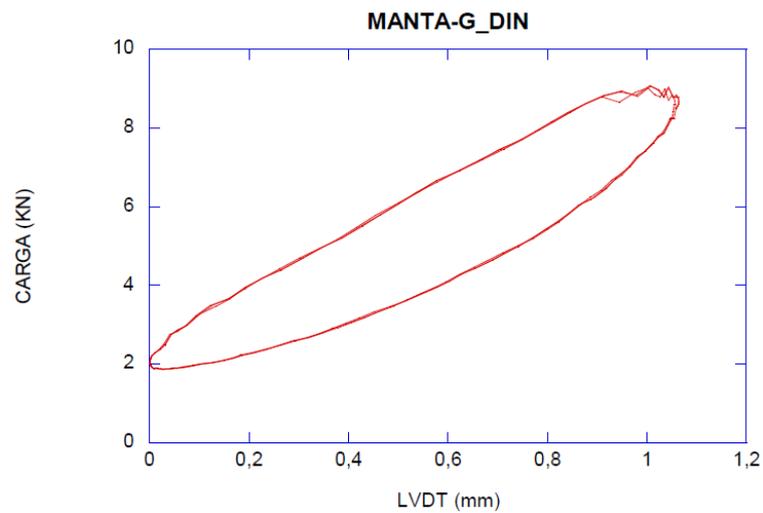


Figura 6-23 Curva carga – desplazamiento medio C_{din} Muestra G (Fuente: LADICIM)

6.4.1.7.4 Resultados muestra G

Muestra G	
Altura de caída crítica (m)	1.26
Módulo de rigidez estático (KN/mm)	4.11
Módulo de rigidez dinámico (KN/mm)	6.77
Masa (kg)	7.56

Tabla 6-14 Resultados muestra G (Fuente: elaboración propia)

6.4.1.8 Muestra H

6.4.1.8.1 Altura de caída crítica

En la tabla se muestran los resultados del ensayo de determinación de la altura de caída crítica en el punto medio de la muestra H.

Muestra H-4			
Punto	Altura (m)	HIC	Altura de Caída Crítica (m)
1	1,11	771	1,30
	1,24	931	
	1,44	1166	
	1,65	1394	
2	0,88	558	1,26
	1,02	700	
	1,41	1204	
	1,52	1352	
3	0,94	633	1,24
	1,08	807	
	1,52	1353	
	1,67	1558	

Tabla 6-15 Resultado ensayo determinación de la altura de caída crítica por puntos. Muestra H (Fuente: Sanpe ingeniería)

A continuación, se muestran las curvas Altura de caída libre – HIC de cada uno de los tres puntos ensayados en la muestra H-4.

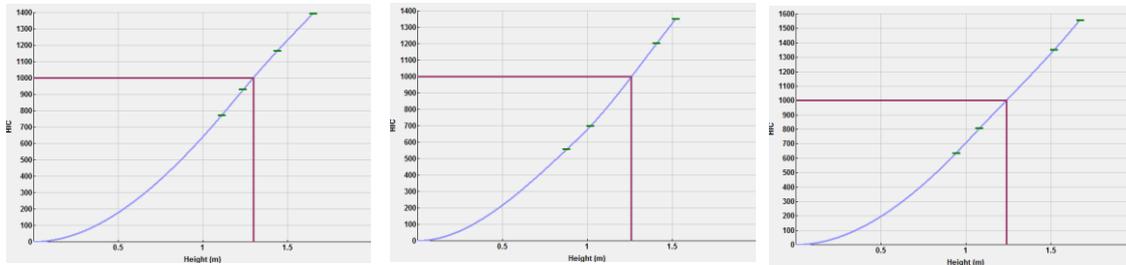


Figura 6-24 Altura de caída - HIC en puntos 1, 2 y 3. Muestra H (Fuente: Sanpe Ingeniería)

El resultado obtenido para la muestra H-4 se toma como la media de la altura de caída crítica de los tres ensayos realizados en este punto: 1.27 m

6.4.1.8.2 Módulo de rigidez estático C_{est}

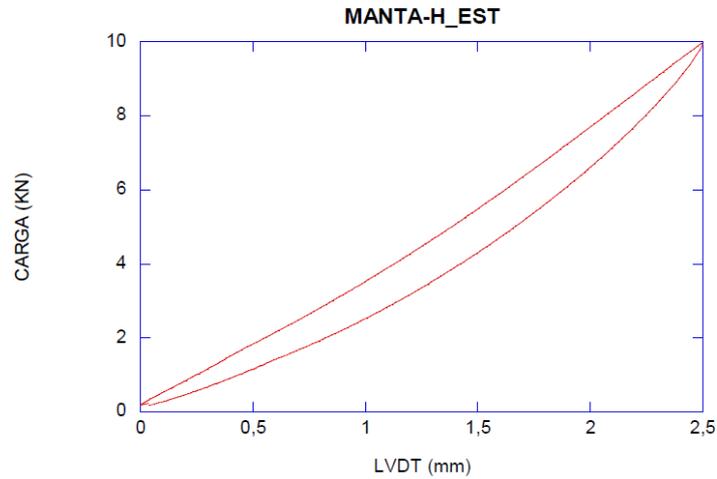


Figura 6-25 Curva carga – desplazamiento medio C_{est} Muestra H (Fuente: LADICIM)

6.4.1.8.3 Módulo de rigidez dinámico C_{din}

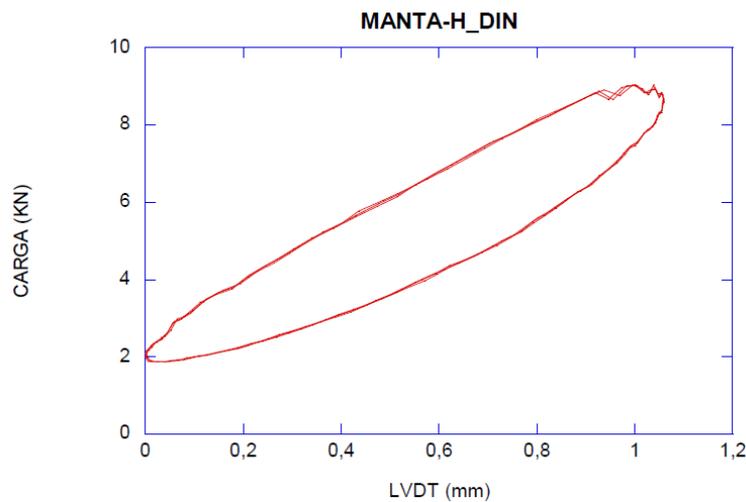


Figura 6-26 Curva carga – desplazamiento medio C_{din} Muestra H (Fuente: LADICIM)

6.4.1.8.4 Resultados muestra H

Muestra h	
Altura de caída crítica (m)	1.27
Módulo de rigidez estático (KN/mm)	4.01
Módulo de rigidez dinámico (KN/mm)	6.80
Masa (kg)	7.34

Tabla 6-16 Resultados muestra H (Fuente: elaboración propia)

6.4.2 RESULTADOS FASE 2

En la segunda fase se han realizado ensayos de determinación de la altura de caída crítica y de rigidez estática.

Para cada rigidez se adjunta la gráfica obtenida con los datos que representa la carga frente al desplazamiento de la muestra.

A continuación, se presentan los resultados de los ensayos realizados atendiendo a cada muestra.

6.4.2.1 Muestra A-6

6.4.2.1.1 Altura de caída crítica

En la tabla se muestran los resultados del ensayo de determinación de la altura de caída crítica en el punto medio de la muestra A-6.

Muestra A-6			
Punto	Altura (m)	HIC	Altura de Caída Crítica (m)
1	1,22	590	1,74
	1,57	881	
	1,86	1128	
	1,94	1250	
2	1,3	667	1,70
	1,59	895	
	1,94	1237	
	2,05	1318	
3	1,33	663	1,71
	1,64	939	
	1,91	1187	
	2,05	1321	

Tabla 6-17 Resultado ensayo determinación de la altura de caída crítica por puntos. Muestra A-6 (Fuente: Sanpe ingeniería)

A continuación, se muestran las curvas Altura de caída libre – HIC de cada uno de los tres puntos ensayados en la muestra A-6.

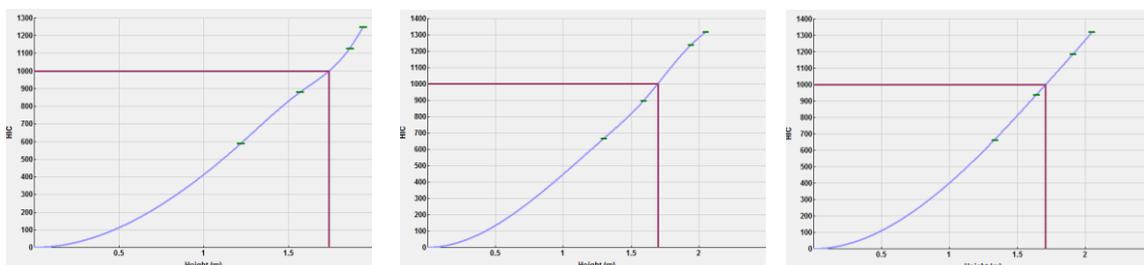


Figura 6-27 Altura de caída - HIC en puntos 1, 2 y 3. Muestra A-6 (Fuente: Sanpe Ingeniería)

El resultado obtenido para la muestra se toma como la media de la altura de caída crítica de los tres ensayos realizados en este punto: 1.72 m

6.4.2.1.2 Módulo de rigidez estático C_{est}

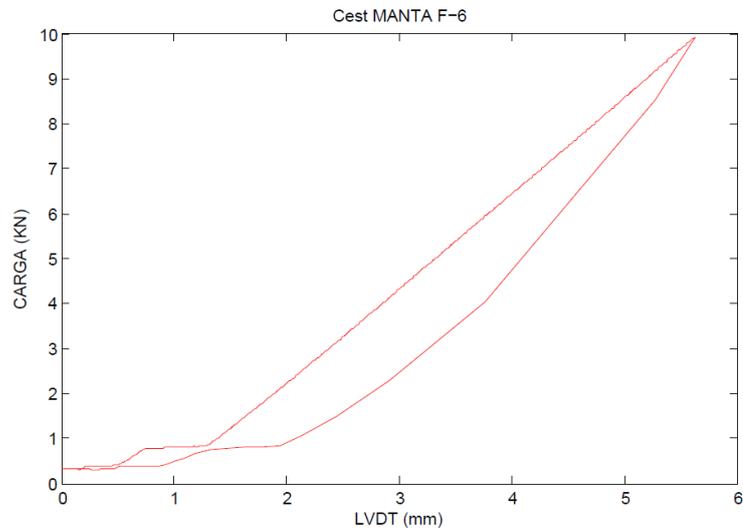


Figura 6-28 Curva carga – desplazamiento medio Cest Muestra A-6 (Fuente: LADICIM)

6.4.2.1.3 Resultados muestra A-6

Muestra A-6	
Altura de caída crítica (m)	1,72
Módulo de rigidez estático (KN/mm)	2.12

Tabla 6-18 Resultados muestra A-6 (Fuente: elaboración propia)

6.4.2.2 Muestra A-8

6.4.2.2.1 Altura de caída crítica

En la tabla se muestran los resultados del ensayo de determinación de la altura de caída crítica en el punto medio de la muestra A-8.

Muestra A-8			
Punto	Altura (m)	HIC	Altura de Caída Crítica (m)
1	1,09	495	1,80
	1,41	711	
	1,81	1009	
	2,03	1176	
2	1,4	683	1,83
	1,64	857	
	1,93	1091	
	2,03	1192	
3	1,39	674	1,88
	1,56	778	
	1,93	1046	
	2,1	1213	

Tabla 6-19 Resultado ensayo determinación de la altura de caída crítica por puntos. Muestra A-8 (Fuente: Sanpe ingeniería)

A continuación, se muestran las curvas Altura de caída libre – HIC de cada uno de los tres puntos ensayados en la muestra A-8: 1.84 m

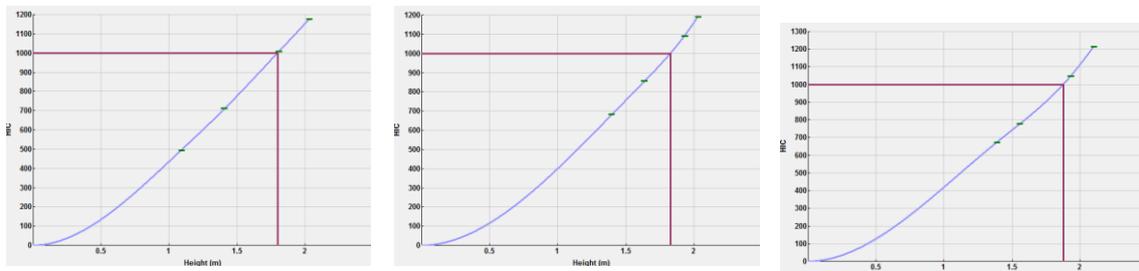


Figura 6-29 Altura de caída - HIC en puntos 1, 2 y 3. Muestra A-8 (Fuente: Sanpe Ingeniería)

El resultado obtenido para la muestra se toma como la media de la altura de caída crítica de los tres ensayos realizados en este punto: 1.84 m

6.4.2.2.2 Módulo de rigidez estático C_{est}

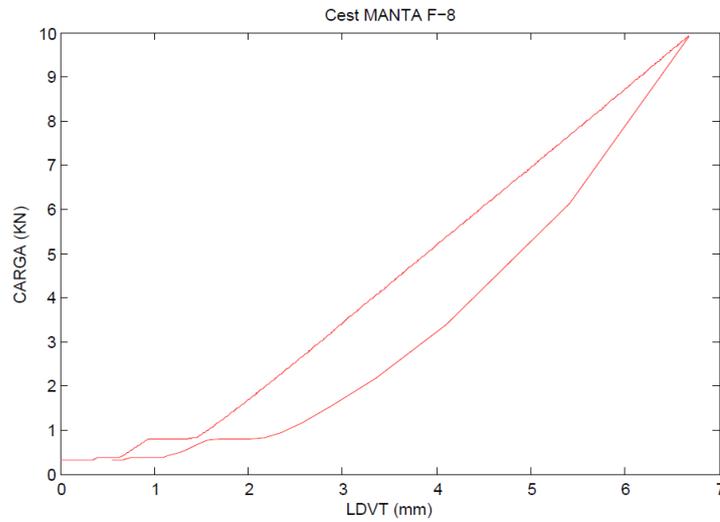


Figura 6-30 Curva carga – desplazamiento medio Cest Muestra A -8 (Fuente: LADICIM)

6.4.2.2.3 Resultados muestra A-8

Muestra A-8	
Altura de caída crítica (m)	1,84
Módulo de rigidez estático (KN/mm)	1.76

Tabla 6-20 Resultados muestra A-8 (Fuente: elaboración propia)

6.4.2.3 Muestra A-10

6.4.2.3.1 Altura de caída crítica

En la tabla se muestran los resultados del ensayo de determinación de la altura de caída crítica en el punto medio de la muestra A-10.

Muestra A-10			
Punto	Altura (m)	HIC	Altura de Caída Crítica (m)
1	1,42	628	2,03
	1,95	952	
	2,17	1090	
	2,34	1179	
2	1,24	504	2,03
	1,69	773	
	2,17	1092	
	2,33	1192	
3	1,28	520	2,10
	1,64	731	
	2,19	1086	
	2,33	1244	

Tabla 6-21 Resultado ensayo determinación de la altura de caída crítica por puntos. Muestra A-10 (Fuente: Sanpe ingeniería)

A continuación, se muestran las curvas Altura de caída libre – HIC de cada uno de los tres puntos ensayados en la muestra A-10.

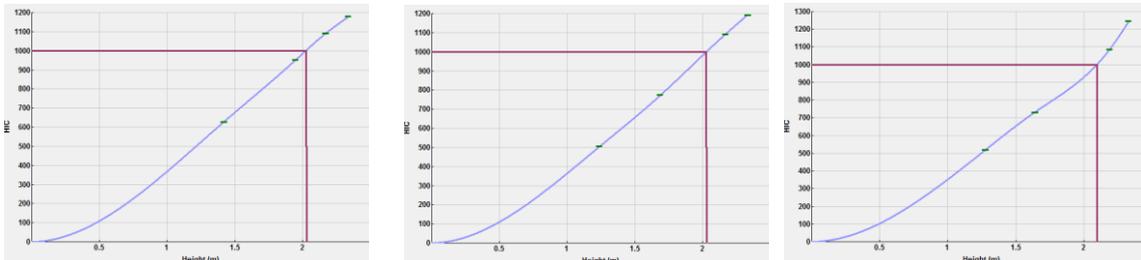


Figura 6-31 Altura de caída - HIC en puntos 1, 2 y 3. Muestra A-8 (Fuente: Sanpe Ingeniería)

El resultado obtenido para la muestra se toma como la media de la altura de caída crítica de los tres ensayos realizados en este punto: 2.05 m

6.4.2.3.2 Módulo de rigidez estático C_{est}

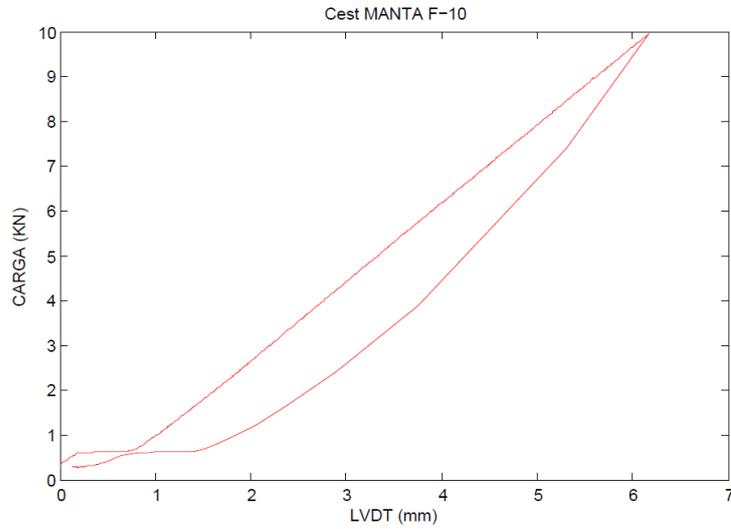


Figura 6-32 Curva carga – desplazamiento medio Cest Muestra A-10 (Fuente: LADICIM)

6.4.2.3.3 Resultados muestra A-10

Muestra A-10	
Altura de caída crítica (m)	2,05
Módulo de rigidez estático (KN/mm)	1.75

Tabla 6-22 Resultados muestra A-10 (Fuente: elaboración propia)

6.4.2.4 Muestra B-6

6.4.2.4.1 Altura de caída crítica

En la tabla se muestran los resultados del ensayo de determinación de la altura de caída crítica en el punto medio de la muestra B-6.

Muestra B-6			
Punto	Altura (m)	HIC	Altura de Caída Crítica (m)
1	1,29	737	1,57
	1,45	888	
	1,78	1212	
	1,96	1430	
2	1,12	579	1,58
	1,45	874	
	1,71	1150	
	1,88	1344	
3	1,22	681	1,58
	1,5	925	
	1,76	1213	
	1,96	1423	

Tabla 6-23 Resultado ensayo determinación de la altura de caída crítica por puntos. Muestra B-6 (Fuente: Sanpe ingeniería)

A continuación, se muestran las curvas Altura de caída libre – HIC de cada uno de los tres puntos ensayados en la muestra B-6.

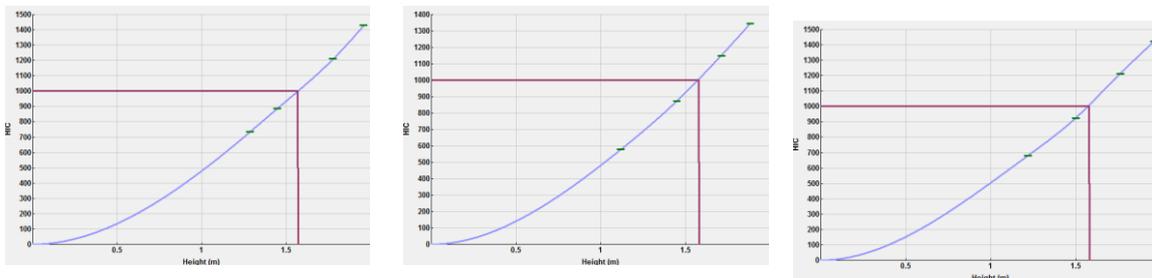


Figura 6-33 Altura de caída - HIC en puntos 1, 2 y 3. Muestra B-6 (Fuente: Sanpe Ingeniería)

El resultado obtenido para la muestra se toma como la media de la altura de caída crítica de los tres ensayos realizados en este punto: 1.58 m

6.4.2.4.2 Módulo de rigidez estático C_{est}

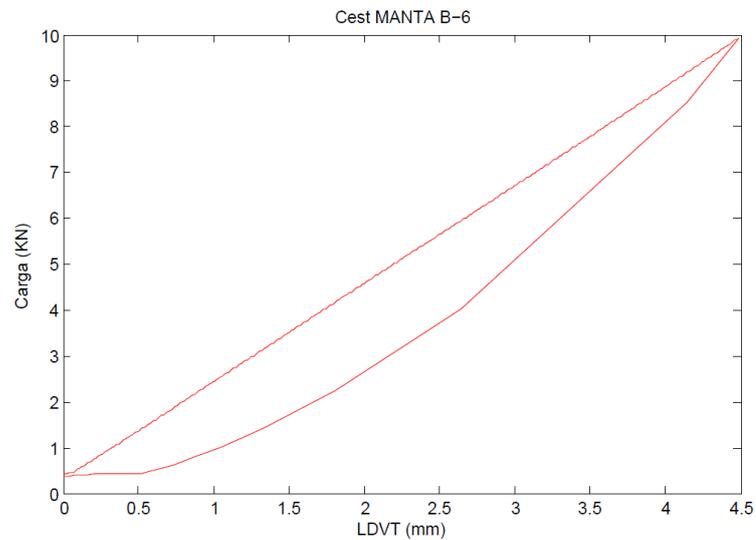


Figura 6-34 Figura 6-35. Curva carga – desplazamiento medio Cest Muestra B-6 (Fuente: LADICIM)

6.4.2.4.3 Resultados muestra B-6

Muestra B-6	
Altura de caída crítica (m)	1,58
Módulo de rigidez estático (KN/mm)	2.14

Tabla 6-24 Resultados muestra B-6 (Fuente: elaboración propia)

6.4.2.5 Muestra B-8

6.4.2.5.1 Altura de caída crítica

En la tabla se muestran los resultados del ensayo de determinación de la altura de caída crítica en el punto medio de la muestra B-8.

Muestra B-8			
Punto	Altura (m)	HIC	Altura de Caída Crítica (m)
1	1,64	732	2,00
	1,85	890	
	2,07	1059	
	2,18	1136	
2	1,58	683	2,05
	1,82	854	
	2,06	1013	
	2,18	1119	
3	1,54	663	2,04
	1,73	781	
	2,05	1014	
	2,17	1115	

Tabla 6-25 Resultado ensayo determinación de la altura de caída crítica por puntos. Muestra B-8 (Fuente: Sanpe ingeniería)

A continuación, se muestran las curvas Altura de caída libre – HIC de cada uno de los tres puntos ensayados en la muestra B-8.

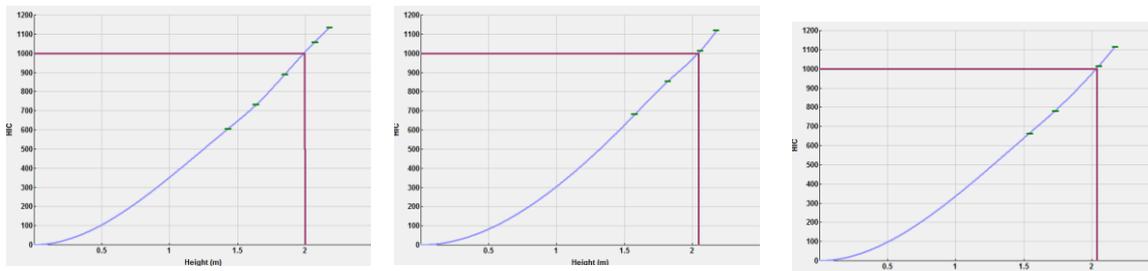


Figura 6-36 Altura de caída - HIC en puntos 1, 2 y 3. Muestra B-8 (Fuente: Sanpe Ingeniería)

El resultado obtenido para la muestra se toma como la media de la altura de caída crítica de los tres ensayos realizados en este punto: 2.03 m

6.4.2.5.2 Módulo de rigidez estático C_{est}

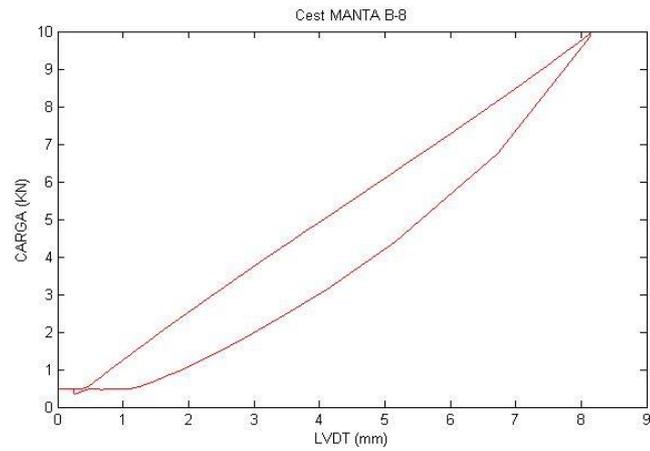


Figura 6-37 Figura 6-38. Curva carga – desplazamiento medio Cest Muestra B-8 (Fuente: LADICIM)

6.4.2.5.3 Resultados muestra B-8

Muestra B-8	
Altura de caída crítica (m)	2,03
Módulo de rigidez estático (KN/mm)	1.20

Tabla 6-26 Resultados muestra B-8 (Fuente: elaboración propia)

6.4.2.6 Muestra B-10

6.4.2.6.1 Altura de caída crítica

En la tabla se muestran los resultados del ensayo de determinación de la altura de caída crítica en el punto medio de la muestra B-10.

Muestra B-10			
Punto	Altura (m)	HIC	Altura de Caída Crítica (m)
1	1,32	492	2,21
	1,64	657	
	2,07	913	
	2,28	1055	
2	1,51	583	2,25
	1,81	750	
	2,08	903	
	2,28	1018	
3	1,31	461	2,25
	1,68	659	
	2,06	882	
	2,28	1022	

Tabla 6-27 Resultado ensayo determinación de la altura de caída crítica por puntos. Muestra B-10 (Fuente: Sanpe ingeniería)

A continuación, se muestran las curvas Altura de caída libre – HIC de cada uno de los tres puntos ensayados en la muestra B-10.

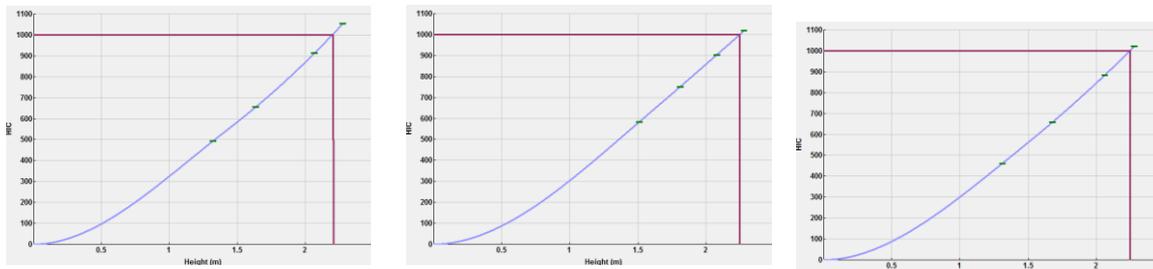


Figura 6-39 Altura de caída - HIC en puntos 1, 2 y 3. Muestra B-10 (Fuente: Sanpe Ingeniería)

El resultado obtenido para la muestra se toma como la media de la altura de caída crítica de los tres ensayos realizados en este punto: 2.34 m

6.4.2.6.2 Módulo de rigidez estático C_{est}

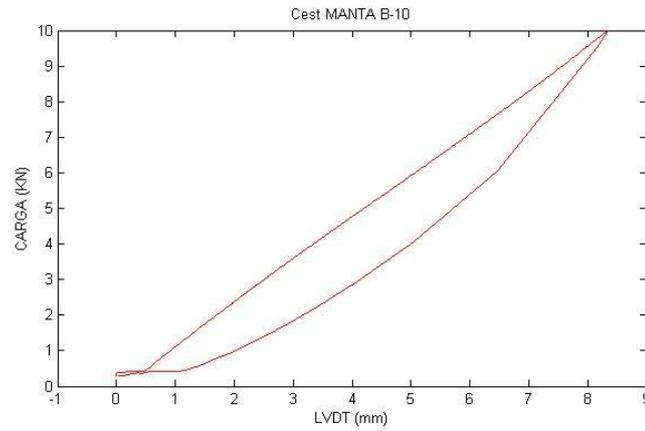


Figura 6-40 Figura 6-41. Curva carga – desplazamiento medio Cest Muestra B-10 (Fuente: LADICIM)

6.4.2.6.3 Resultados muestra B-10

Muestra B-10	
Altura de caída crítica (m)	2,24
Módulo de rigidez estático (KN/mm)	1.20

Tabla 6-28 Resultados muestra B-10 (Fuente: elaboración propia)

6.4.2.7 Muestra C-6

6.4.2.7.1 Altura de caída crítica

En la tabla se muestran los resultados del ensayo de determinación de la altura de caída crítica en el punto medio de la muestra C-6.

Muestra C-6			
Punto	Altura (m)	HIC	Altura de Caída Crítica (m)
1	1,3	711	1,63
	1,54	920	
	1,8	1186	
	2,02	1414	
2	1,22	639	1,65
	1,5	855	
	1,82	1198	
	1,99	1368	
3	1,29	701	1,64
	1,53	904	
	1,8	1174	
	1,95	1333	

Tabla 6-29 Resultado ensayo determinación de la altura de caída crítica por puntos. Muestra C-6 (Fuente: Sanpe ingeniería)

A continuación, se muestran las curvas Altura de caída libre – HIC de cada uno de los tres puntos ensayados en la muestra C-6.

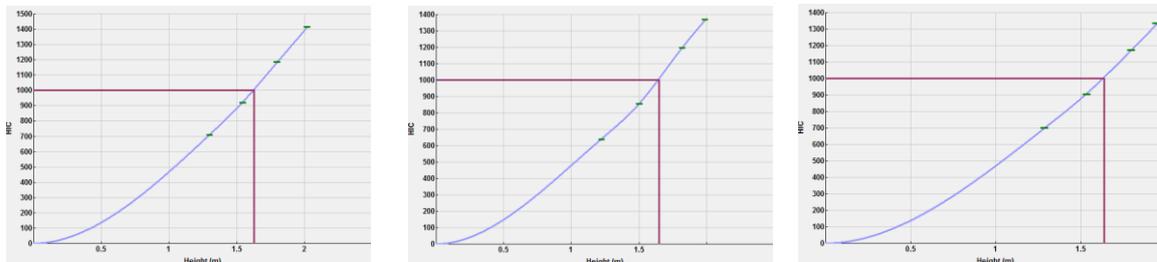


Figura 6-42 Altura de caída - HIC en puntos 1, 2 y 3. Muestra C-6 (Fuente: Sanpe Ingeniería)

El resultado obtenido para la muestra se toma como la media de la altura de caída crítica de los tres ensayos realizados en este punto: 1.64 m

6.4.2.7.2 Módulo de rigidez estático C_{est}

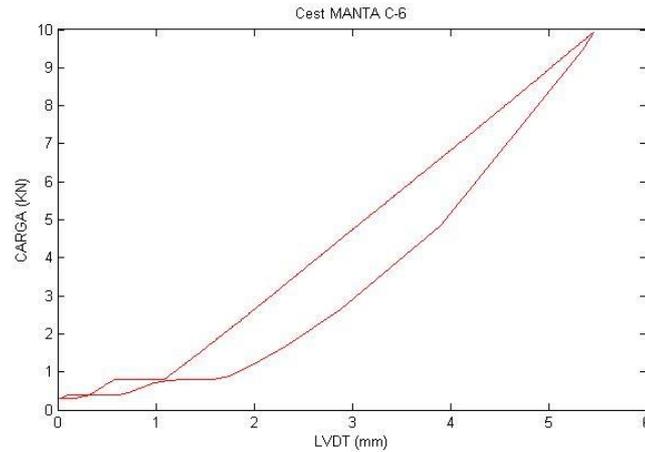


Figura 6-43 Figura 6-44. Curva carga – desplazamiento medio Cest Muestra C-6 (Fuente: LADICIM)

6.4.2.7.3 Resultados muestra C-6

Muestra C-6	
Altura de caída crítica (m)	1,64
Módulo de rigidez estático (KN/mm)	2.10

Tabla 6-30 Resultados muestra C-6 (Fuente: elaboración propia)

6.4.2.8 Muestra C-8

6.4.2.8.1 Altura de caída crítica

En la tabla se muestran los resultados del ensayo de determinación de la altura de caída crítica en el punto medio de la muestra C-8.

Muestra C-8			
Punto	Altura (m)	HIC	Altura de Caída Crítica (m)
1	1,41	697	1,76
	1,59	864	
	1,99	1188	
	2,16	1344	
2	1,41	703	1,79
	1,64	883	
	1,95	1133	
	2,11	1279	
3	1,42	710	1,81
	1,63	863	
	1,91	1093	
	2,13	1285	

Tabla 6-31 Resultado ensayo determinación de la altura de caída crítica por puntos. Muestra C-8 (Fuente: Sanpe ingeniería)

A continuación, se muestran las curvas Altura de caída libre – HIC de cada uno de los tres puntos ensayados en la muestra C-8.

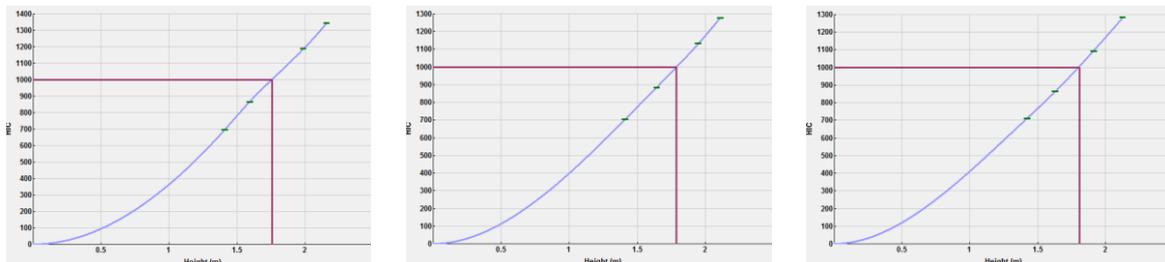


Figura 6-45 Altura de caída - HIC en puntos 1, 2 y 3. Muestra C-8 (Fuente: Sanpe Ingeniería)

El resultado obtenido para la muestra se toma como la media de la altura de caída crítica de los tres ensayos realizados en este punto: 1.79 m

6.4.2.8.2 Módulo de rigidez estático C_{est}

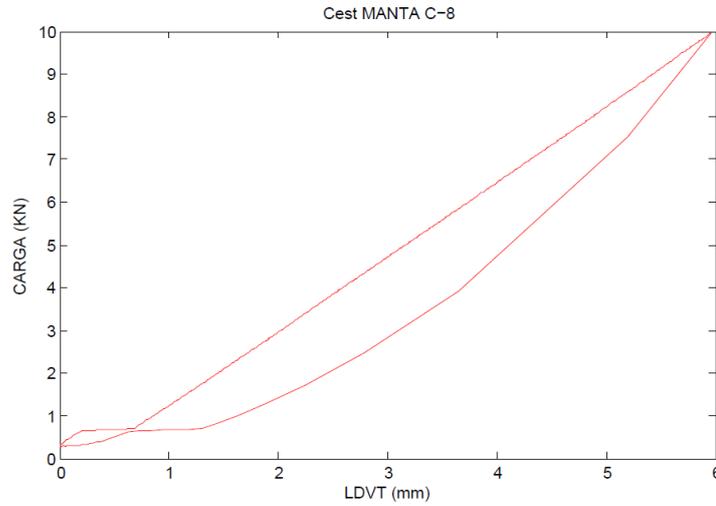


Figura 6-46 Figura 6-47. Curva carga – desplazamiento medio Cest Muestra C-8 (Fuente: LADICIM)

6.4.2.8.3 Resultados muestra C-8

Muestra C-8	
Altura de caída crítica (m)	1,79
Módulo de rigidez estático (KN/mm)	1.76

Tabla 6-32 Resultados muestra C-8 (Fuente: elaboración propia)

6.4.2.9 Muestra C-10

6.4.2.9.1 Altura de caída crítica

En la tabla se muestran los resultados del ensayo de determinación de la altura de caída crítica en el punto medio de la muestra C-10.

Muestra C-10			
Punto	Altura (m)	HIC	Altura de Caída Crítica (m)
1	1,33	505	2,21
	1,77	755	
	2,15	973	
	2,31	1055	
2	1,52	584	2,26
	1,84	764	
	2,16	966	
	2,31	1016	
3	1,42	541	2,22
	1,78	735	
	2,13	944	
	2,31	1066	

Tabla 6-33 Resultado ensayo determinación de la altura de caída crítica por puntos. Muestra C-10 (Fuente: Sanpe ingeniería)

A continuación, se muestran las curvas Altura de caída libre – HIC de cada uno de los tres puntos ensayados en la muestra C-10.

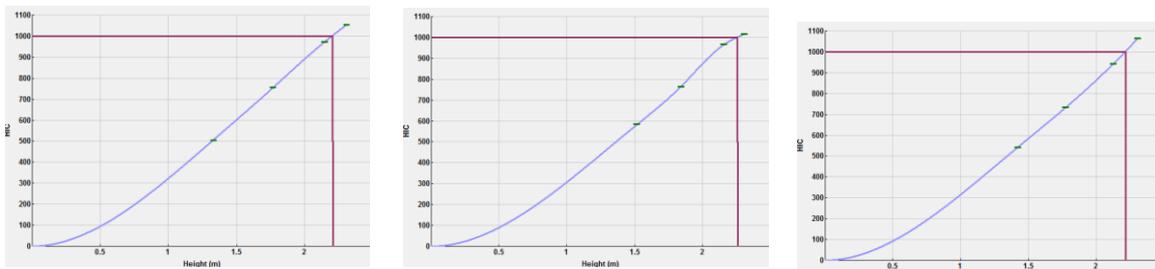


Figura 6-48 Altura de caída - HIC en puntos 1, 2 y 3. Muestra C-10 (Fuente: Sanpe Ingeniería)

El resultado obtenido para la muestra se toma como la media de la altura de caída crítica de los tres ensayos realizados en este punto: 2.23 m

6.4.2.9.2 Módulo de rigidez estático C_{est}

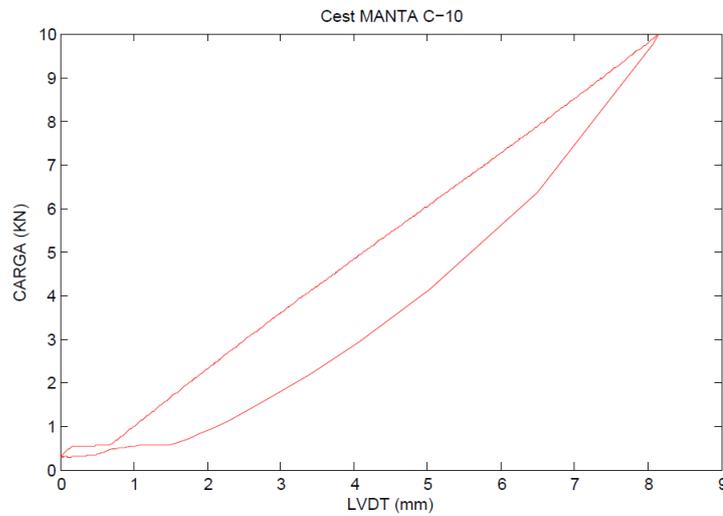


Figura 6-49 Figura 6-50. Curva carga – desplazamiento medio Cest Muestra C-10 (Fuente: LADICIM)

6.4.2.9.3 Resultados muestra C-10

Muestra C-10	
Altura de caída crítica (m)	2,23
Módulo de rigidez estático (KN/mm)	1.25

Tabla 6-34 Resultados muestra C-10 (Fuente: elaboración propia)

6.5 RESUMEN DE RESULTADOS

Se recogen los resultados obtenidos agrupados por fases

6.5.1 RESUMEN RESULTADOS FASE 1

Muestra	Altura de caída crítica (m)	C _{est} (KN/mm)	C _{din} (KN/mm)	Masa (kg)
A	1.30	2,82	4,74	7.08
B	1.33	4,34	7,24	7.24
C	1.34	3,53	5,92	7.52
D	1.27	4,2	6,88	7.60
E	1.16	5,79	10,15	6.64
F	1.35	4,08	7,05	6.66
G	1.26	4,11	6,77	7.56
H	1.27	4,01	6,80	7.34

6.5.2 RESUMEN RESULTADOS FASE 2

Muestras tipo A			
Muestra	Espesor (mm)	Altura de Caída Crítica (m)	C _{est} (KN/mm)
A-6	60	1,72	2,12
A-8	80	1,84	1,76
A-10	100	2,05	1,75

Muestras tipo B			
Muestra	Espesor (mm)	Altura de Caída Crítica (m)	C _{est} (KN/mm)
B-6	60	1,58	2,14
B-8	80	2,03	1,20
B-10	100	2,24	1,20

Muestras tipo C			
	Espesor (mm)	Altura de Caída Crítica (m)	Cest (KN/mm)
C-6	60	1,64	2,10
C-8	80	1,79	1,76
C-10	100	2,23	1,25

7 ANÁLISIS Y CONCLUSIONES TÉCNICAS

En el presente apartado se realiza un análisis de los resultados obtenidos en los ensayos realizados sobre las muestras descritas en el apartado 5.2, que como se explica, se ha dividido en dos fases.

En el proceso de planificación de la parte experimental del trabajo, ante los medios disponibles, se decidió realizar principalmente dos tipos de ensayos.

La realización del ensayo de determinación de la Altura de Caída Crítica era algo indispensable en la realización de este trabajo al enmarcarse en el contexto de pavimentos de seguridad en parques infantiles, y ser este el ensayo que mide el amortiguamiento de las superficies, indicándolo la norma vigente como el mecanismo para comprobar los niveles de seguridad de las superficies absolvedoras de impactos.

Pero este no es el único ensayo que se ha realizado, ya que cabe esperar que las propiedades de amortiguación de un material estén directamente relacionadas con su elasticidad y rigidez. ¹

Al contar en la Universidad de Cantabria con un laboratorio que ha investigado sobre mismo caucho SBR revalorizado que suele emplearse en la instalación de superficies de seguridad de parques infantiles, pero aplicado a su utilización como mantas elastoméricas antivibratorias en estructuras ferroviarias

El laboratorio de la división de ciencia e ingeniería de los materiales (LADICIM) cuenta con los medios y experiencia necesaria para la realización de ensayos de rigidez en muestras fabricadas con este tipo de material.

Es por ello que en el proceso de planificación de la parte experimental del trabajo se decidió incluir en primera instancia los ensayos de rigidez estática, y en segundo término, los de rigidez dinámica. En principio, con la idea de obtener una relación directa entre los resultados obtenidos en estos ensayos con los extraídos del ensayo de Determinación de la Altura de Caída Crítica.

De este modo, presentados los resultados obtenidos en el apartado 6, a continuación, se procede a su análisis diferenciando las dos fases del trabajo:

7.1 FASE 1

En la fase 1 se han realizado ensayos de determinación de la altura de caída crítica, rigidez estática y rigidez dinámica

Estos ensayos se han realizado sobre ocho muestras del mismo espesor facilitadas por el fabricante Vulgalia. Para la elaboración de estas muestras bicapa, formadas por una capa superior de 10 mm de EPDM y por una inferior de 30 mm de SBR revalorizado, se ha utilizado como única variable la diferente composición de la capa de SBR.

Se dispone de 3 granulometrías diferentes de SBR, que se han principalmente se han combinado para obtener las distintas muestras. En una de las muestras se mezcló con paja, y en otra se utilizó ahorros de material.

7.1.1 Altura de caída crítica

En la siguiente figura se muestran los valores de altura de caída crítica obtenidos en cada las muestras, representando el valor medio de los tres ensayos realizados por muestra, así como su desviación.

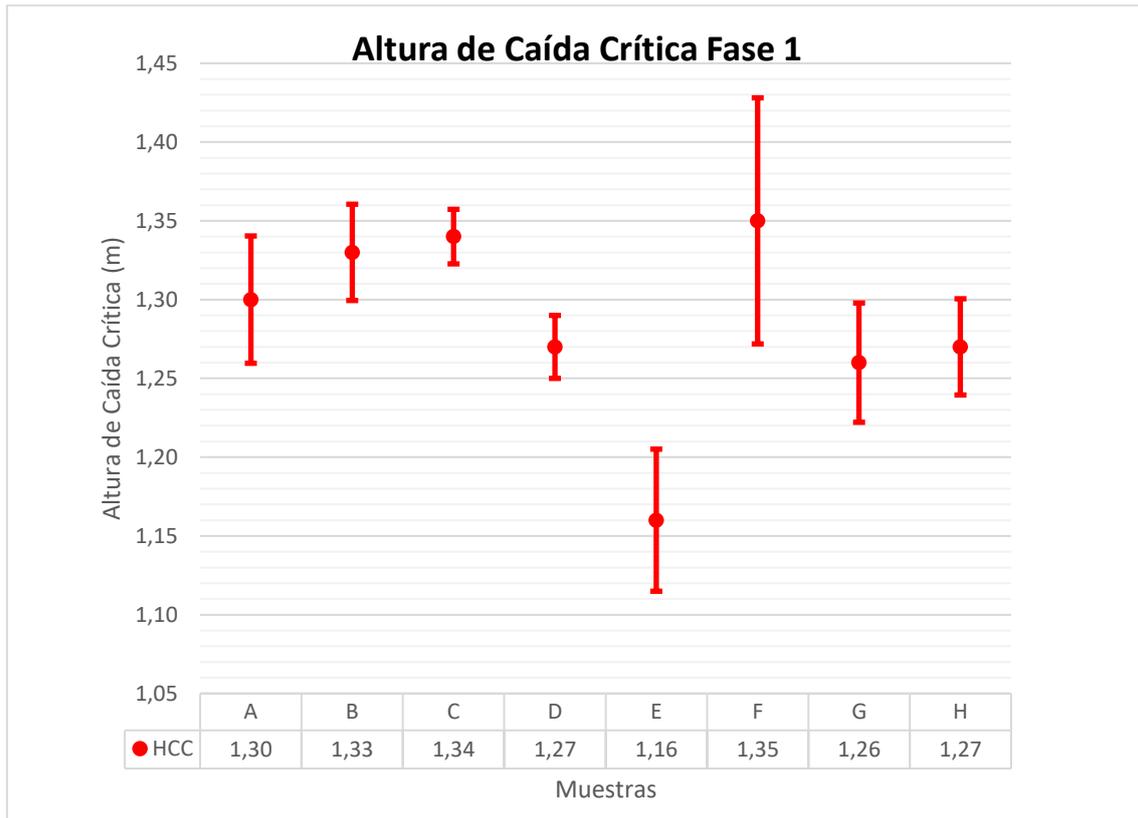


Figura 7-1 Altura de Caída Crítica y desviación típica en Fase 1

Las alturas libres de caída de las muestras ensayadas varían desde el menor obtenido en la muestra E, que está mezclada con paja, con 1.11 m, hasta 1.44 m en uno de los ensayos de la muestra F, que es la muestra con ahorros de material. Por lo tanto, estamos ante resultados, que en sus valores más extremos tienen diferencias significativas de 33 cm.

Para tratar de simplificar los resultados obtenidos y poder agrupar las muestras en diferentes grupos, si se aplica el criterio que define la norma EN 1177 para la obtención del resultado de la altura de caída crítica, explicado en el apartado 5.1.1.2.2 por el cual el resultado obtenido debe de redondearse al decimal inferior, se podrían considerar tres resultados: 1.10 m, 1.20 m y 1.30 m de altura de caída crítica.

Aplicando este criterio a los valores medios de los resultados obtenidos, obtendríamos la siguiente distribución de resultados según las muestras:

- Las muestras A, B, C y F tendrían 1.30 m de altura de caída crítica.

- Las muestras D, G y H 1.20 m de altura de caída crítica.
- La muestra E tendría 1.10 m de altura de caída crítica.

Por lo tanto, los mejores resultados se obtienen para las tres muestras cuya capa inferior está formada por un único tipo de granulometría (A, B y C). Los valores obtenidos para estas muestras son muy similares.

En esta categoría también se encuentra la muestra F, que tiene la particularidad de tener ahorros de material en la capa inferior, por lo que está concebida para fabricarse como loseta de caucho. Sobre la particularidad de la muestra F se hablará más adelante.

En el segundo escalón se encuentran las muestras que se han fabricado con una capa inferior formada por la mezcla de las diferentes granulometrías. Las muestras D y H, compuesta en el primer caso por la mezcla a partes iguales del SBR de mayor granulometría con el intermedio, y en el otro por la composición al 50% de la granulometría intermedia con la más pequeña. La muestra G es la que se encuentra compuesta por una mezcla a partes iguales entre los tres tipos de granulometría disponibles.

Y en último término, con los peores resultados de amortiguamiento se encuentra la muestra E. Dicha muestra es la que contiene una porción de paja en la capa inferior, mezclada con la resina y el SBR de menor granulometría.

Del análisis y discretización realizada, se obtienen las siguientes conclusiones:

- La paja incluida en la muestra E aporta ligereza al material, pero empeora su comportamiento en cuanto a la amortiguación de impactos. Esto se debe a que la paja tiene peores propiedades elásticas que el caucho empleado, de manera que al mezclarse disminuyen las características amortiguadoras del SBR, y con ello presenta un peor comportamiento en cuanto a absorción de impactos.

La muestra C, que tiene la misma composición que la muestra E a excepción de la paja, ofrece alturas de caída crítica un 15.5 % superiores a los de la muestra C (1.34 m frente a 1.16 m).

- Las muestras fabricadas con un único material son las que presentan un mejor amortiguamiento.

Una posible hipótesis explicativa es que estas muestras cuentan con mayor volumen de huecos entre los granos del SBR. Esta capa está formada por la mezcla del SBR más un 15 % del peso del SBR de resina.

En estas muestras, al existir más huecos, la cantidad de resina empleada es menor (son algo más ligeras), pudiendo existir huecos de aire que aumenten la amortiguación. Es posible que los granos de SBR tienen una mayor libertad de movimientos, ya que el contacto con otras partículas es menor, produciéndose menos rozamientos entre granos, poseyendo mayor elasticidad.

En cualquier caso, este efecto no es muy acentuado, ya que los valores medios de los ensayos de altura de caída crítica varían del orden de 5 cm.

Lo que sí es cierto, es que las muestra que obtienen mejores resultados, A, B y C, al estar formados por una única granulometría, son las menos pesadas. De esta forma, con menor cantidad de material se consigue un mayor amortiguamiento (muestras D, G y H).

- Los resultados obtenidos en la muestra F no son comparables con el del resto de las muestras al haber empleado una única muestra F. Esto se debe a que la tipología de esta muestra es la de loseta de caucho en vez de la de caucho continuo.

Que sea una loseta de caucho significa que cuando se fabrique para su instalación será una baldosa de caucho con unas dimensiones determinadas, que al instalarse en obra y unirse al resto de losetas, presentará juntas de unión.

Las juntas de unión son puntos que también deben de ensayarse, y en los que generalmente se obtienen peores resultados de amortiguamiento que en el punto medio de la losa. El punto crítico, en la mayoría de los casos, es en el que se encuentran las cuatro losetas de caucho, y es el valor más bajo el que indica la norma EN 1177 que debe tomarse como resultado del ensayo.

En la siguiente imagen se muestra una fotografía de la realización de un ensayo de determinación de la altura de caída crítica sobre losetas prefabricadas de caucho aligeradas. Como se puede observar, simulan su disposición final en un parque, por lo que al ensayarse habrá que tomar los puntos medios de las juntas y el punto de unión de las cuatro baldosas de caucho.



Ilustración 7-1 Ensayo determinación de la altura de caída de caída crítica de losetas de caucho prefabricadas. (Fuente: Sanpe Ingeniería)

Por lo tanto, con casi total seguridad, el resultado obtenido en los ensayos de la muestra F no es real debido a su tipología, teniendo que ser reducido en un pequeño porcentaje que no se ha podido cuantificar.

- En cuanto a la muestra F, cuenta con otra particularidad que queda reflejada en los resultados. Se trata de una muestra con ahorros de material, de manera que se ha fabricado en un molde en el que en la parte inferior se ha definido una geometría variable en forma de picos, marcando un espesor máximo de 40 mm. Esta geometría queda representada de manera aproximada en el siguiente croquis explicativo.

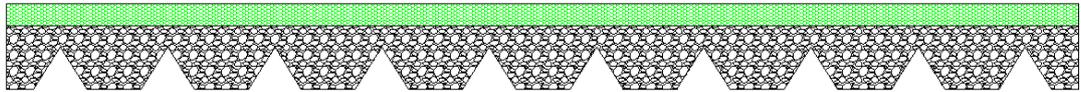


Figura 7-2 Croquis del aligeramiento de la sección transversal de la muestra F. (Fuente propia)

Observando las alturas de caída crítica obtenidas para cada uno de los tres ensayos realizados sobre la muestra F, y tal como se puede ver en la Figura 7-1 Altura de Caída Crítica y desviación típica en Fase 1₇ la muestra F es la que presenta una mayor desviación entre ensayos.

El primer punto ensayado es el valor amortiguamiento más alto obtenido de todas las muestras, con una altura de caída crítica de 1.44 m. Sin embargo, los otros dos puntos ensayados dan como resultado 1.30 m y 1.31 m, valores muy inferiores a los del primer punto.

La explicación a estos valores tan dispares se debe a la geometría que tiene la muestra. El ensayo de determinación de la altura de caída crítica mide el HIC para un impacto puntual en una posición determinada, por lo que es posible que el primer punto ensayado y los dos últimos no sean exactamente los mismos.

Esto significa que el primer impacto se ha producido en una zona en la que por la parte inferior existen ahorros de material, de manera que el impacto se realiza en un área que cuenta con un espesor de caucho menor de 40 mm y un hueco (aire). De manera que es previsible que exista un mayor amortiguamiento en estas zonas que en las que el espesor del material es de 40 mm, lugares en los que se han producido los ensayos de los puntos 2 y 3 al haberse movido ligeramente el punto de impacto de la cabeza-maniquí del equipo de ensayo.

Los puntos 2 y 3 toman valores muy similares a los de las muestras A, B y C. Si se tiene en cuenta la composición de la muestra F, esta sería la equivalente a la muestra A, pero con ahorro de material, por lo que, si efectivamente los ensayos de los dos últimos puntos se han producido

en las zonas macizas, tiene coherencia que los resultados tengan el mismo orden de magnitud que en la dicha muestra.

7.1.2 Ensayos de rigidez

En la primera fase también se han realizado ensayos de rigidez estática y dinámica.

Estos ensayos se realizan ya que se cree que es posible caracterizar el amortiguamiento de un material mediante su rigidez. Es lógico pensar que en general, un material con una rigidez alta como puede ser el hormigón tenga una baja amortiguación, y viceversa. Es decir, un material como el hormigón, al sufrir una carga exterior en forma de impacto presentará una deformación muy baja, incluso nula, de manera que el comportamiento de un material como este no es adecuado para su uso como pavimento de seguridad en parques infantiles, ya que no absorbe la energía de los impactos como puede ser la caída de un niño contra el suelo deformándose.

Por el contrario, un mecanismo como puede ser un airbag, una bolsa llena de aire, o un castillo hinchable, tendrá una rigidez muy baja, y un amortiguamiento ante impactos muy bueno. En este caso, ante la aplicación de una carga externa o un impacto, el airbag se deformará mucho, siendo este el mecanismo de absorción de la energía liberada.

En el caso de los pavimentos de los parques infantiles, se busca una superficie que sea capaz de absorber los impactos, pero que a la vez sea fácilmente transitable y accesible, ya que un pavimento formado por una bolsa de aire como un castillo hinchable o tipo cama elástica, tendría muy buenos resultados en cuanto a amortiguación, pero en la práctica sería impensable tal y como están concebidos los parques infantiles de hoy en día.

Un material como el caucho continuo es muy aconsejable para su instalación en parques infantiles, ya que se pueden conseguir superficies seguras que cumplan con la normativa, con las ventajas adicionales de ser accesible para sillas de ruedas, no tener juntas, ser reparable, permeable, salubre, y con un relativo bajo coste de mantenimiento.

Como ya se ha comentado en el apartado 4.3.2, el caucho revalorizado ligado con resina de poliuretano es adecuado para la fabricación de mantas anti vibratorias para ferrocarril, y los ensayos de rigidez se utilizan para caracterizar el material. El uso de este ensayo en este material, y su posible relación con el amortiguamiento es lo que hace plantearse llevar a cabo este ensayo.

En los parques infantiles no llegan, ni mucho menos, a las cargas simuladas en este ensayo, pero hay que tener en cuenta que la aplicación de dichas cargas es simplemente el procedimiento especificado para obtener los resultados.

La rigidez estática es el parámetro que tiene más sentido en un caucho continuo aplicado a parques infantiles, ya que se trata de simular los impactos de una persona al caerse contra el suelo. En cambio, la rigidez dinámica es un parámetro que no representa el comportamiento de las superficies de las áreas de juego, ya que con

este ensayo se intenta simular el cómo actúa la manta antivibratoria ante el paso de los vehículos ferroviarios.

Por lo tanto, una vez realizado los ensayos, se procede a su análisis. En primer lugar, se ha elaborado una gráfica que representa de forma visual los resultados obtenidos, y a continuación se presentan estos resultados en relación con la altura de caída crítica obtenida para cada muestra, al ser este el parámetro estandarizado para identificar el nivel de seguridad de un parque infantil.

Del análisis de estos gráficos se extraen algunas de las conclusiones en relación a los ensayos de rigidez.

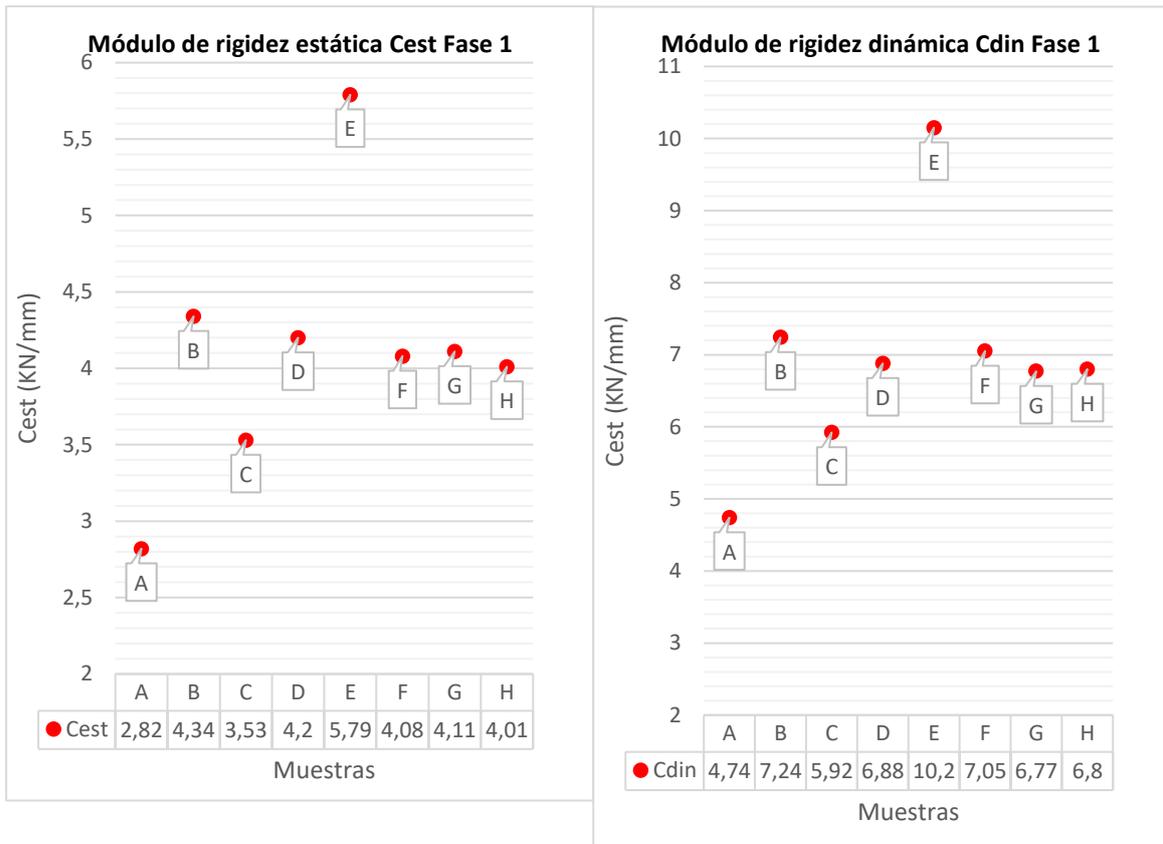


Figura 7-3 Rigidez estática y dinámica en Fase 1.

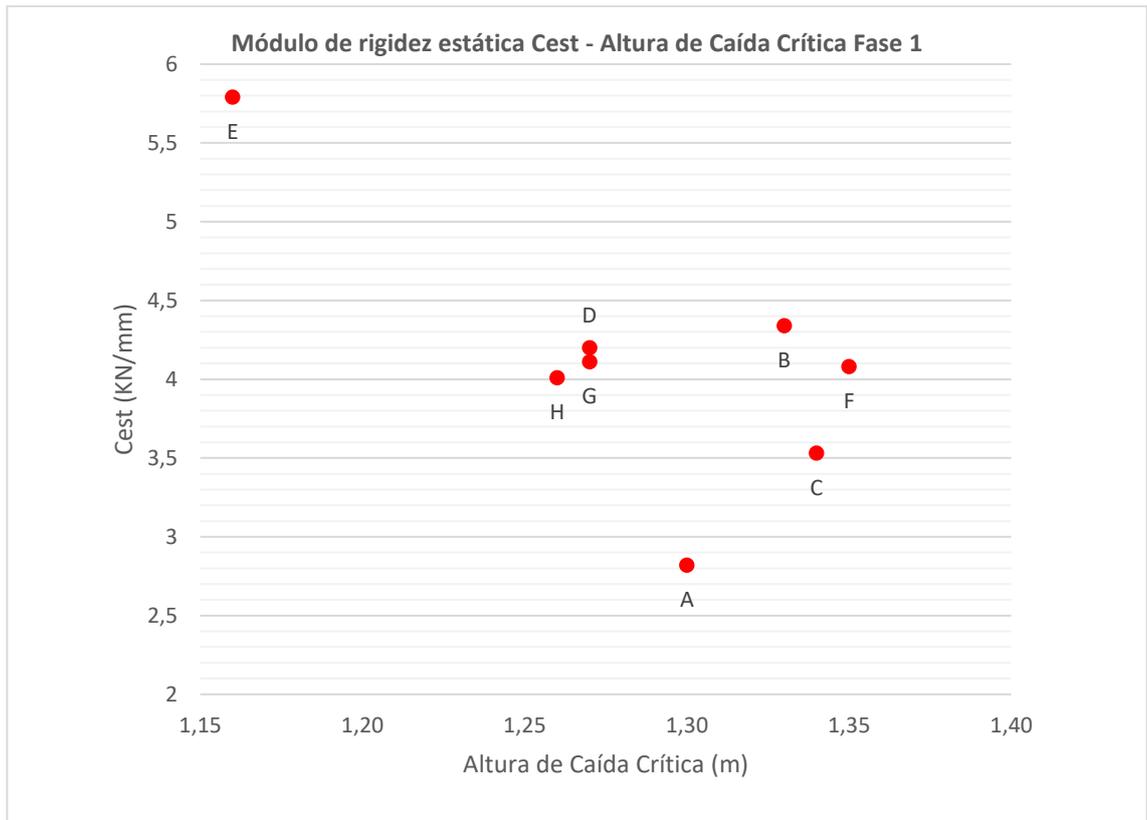


Figura 7-4 Rigidez estática – Altura de Caída Crítica en Fase 1.

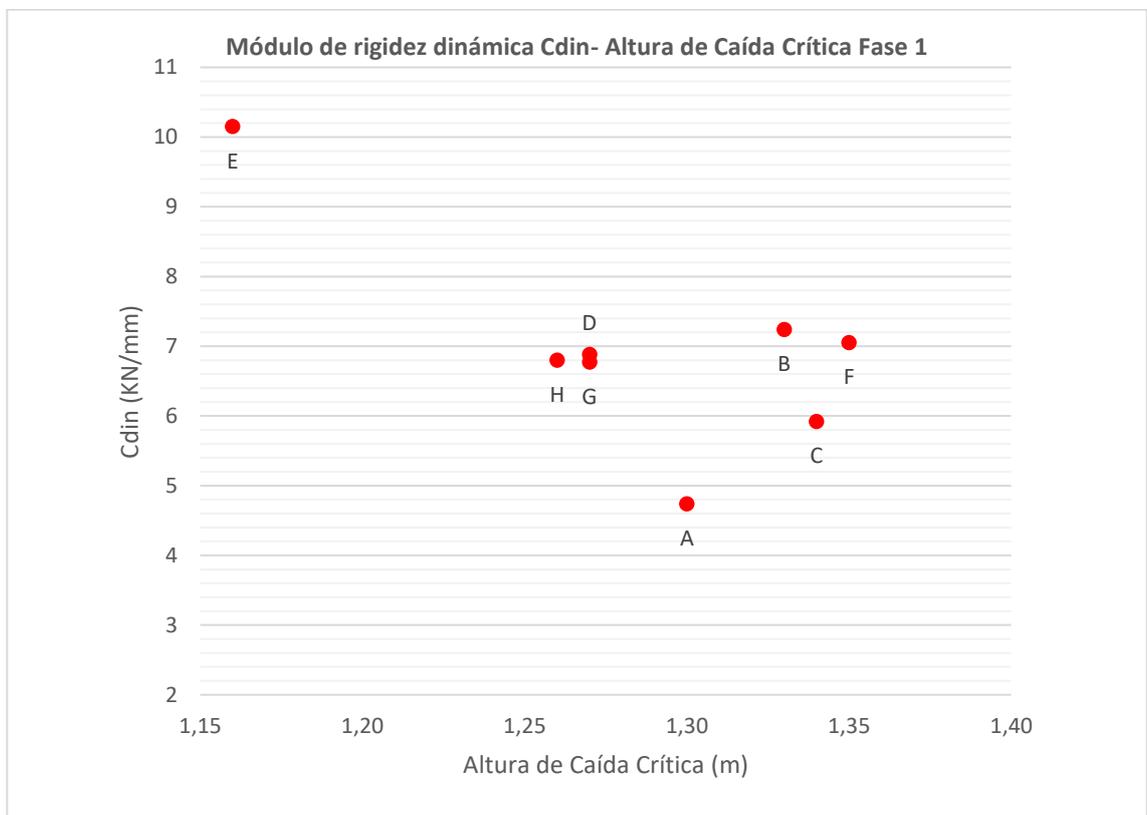


Figura 7-5 Rigidez dinámica – Altura de Caída Crítica en Fase 1.

De acuerdo a lo analizado para el ensayo de determinación de la altura de caída crítica en la primera fase, la muestra E es la que tiene peor comportamiento frente a la absorción de impactos, y en ambos ensayos de rigidez es la que obtiene el valor más elevado, significativamente superior al del resto de las muestras en los dos casos.

Por otro lado, existe un grupo de muestras, todas a excepción de la A y la E, que presenta valores de rigideces muy similares, tanto el módulo de rigidez estático (entre 4.84 KN/mm y 3.53 KN/mm), como del módulo de rigidez dinámico (entre 7.24 KN/mm y 5.92 KN/mm). Todas estas muestras, si se considera el valor medio de altura de caída crítica, tienen valores muy similares de amortiguamiento, quedando en un rango de 9 cm (entre 1.35 m y 1.26 m)

Por último, la muestra A es la que obtiene un valor significativamente más bajo, tanto para el ensayo de rigidez estática como para el de dinámica, 2.82 KN/mm y 4.74 KN/mm respectivamente. Además, la muestra A es de las que obtiene mayores alturas de caída crítica, habiéndola considera en el grupo de muestras con mejores propiedades de amortiguamiento.

En estas muestras no se sigue el estrictamente el mismo orden del valor de rigideces que el orden de alturas de caída crítica. De manera que las probetas F, C y B, que son las tres que tienen mayor amortiguamiento de mayor a menor, tanto en rigidez estática como en dinámica ocupan respectivamente la sexta, séptima y segunda posición de valores más bajos.

Los valores de rigidez más bajos son los que debieran corresponderse con las muestras con mejores resultados de amortiguamiento. Esto solo ocurre en el caso de la muestra A. El caso contrario si queda bien reflejado en la muestra E, que es la probeta de mayor rigidez y la de peor amortiguamiento.

Por lo tanto, el comportamiento esperado sólo se ve reflejado en las muestras A y E, que tienen resultados de rigideces y amortiguamiento significativamente diferentes, y cuanto mayor es el amortiguamiento menor es la rigidez, y viceversa.

El resto de muestras realmente tienen resultados de rigideces y amortiguamiento muy parecidos, pero rigideces significativamente menores que la muestra E, por lo que sí se puede esbozar que la hipótesis de que existe una relación entre la rigidez y el amortiguamiento calculado mediante la altura de caída crítica es correcta, pero su correlación se intuye muy compleja, ya que no existe una correspondencia absoluta.

Por lo que según analizado al término de la primera fase se concluye:

- No existe una correlación directa entre el ensayo de determinación de la altura de caída libre, al menos para muestras de diferente tipología con el mismo espesor.

Se antoja muy complicado desarrollar un método con el que calcular las alturas de caída críticas a partir de la realización de ensayos de rigidez estática o dinámica en laboratorio.

- El ensayo de determinación de la altura de caída crítica es más sensible en cuanto a definir las diferencias de las propiedades absorbedoras de impactos de los distintos materiales, al menos en pavimentos de caucho continuo.
- En cuanto a la muestra F, su geometría interfiere de forma diferente en los dos ensayos. En el ensayo de amortiguación adquiere importancia el punto sobre el que se realice el impacto, y si esta zona se encuentra aligerada o no (pudiendo obtener puntos con amortiguamientos muy altos), mientras que, en los ensayos de rigidez al aplicar la carga mediante una placa, el efecto mencionado se disipa, obteniendo rigideces incluso más elevadas que otras muestras.

Una vez analizada la primera fase, se puede entender la concepción de la segunda y última fase. Al no obtener una relación clara entre ambos ensayos, se decide fabricar probetas de la misma tipología con diferentes espesores, de manera que se produzcan cambios más significativos en ambos ensayos.

Se decide finalmente escoger las tres muestras con valores más altos de altura de caída crítica fabricarlas con las mismas características variando el espesor, sin tener en cuenta la muestra F al tratarse de una muestra de diferente aplicación del caucho, y no existir una forma clara de realizar los ahorros de material de forma efectiva para espesores mayores.

El fabricante facilita muestras escogidas, del tipo A, B y C, con tres espesores diferentes, 60, 80 y 100 mm, no fabricando muestras de mayor espesor ya que no es habitual encontrar parques con pavimentos de caucho continuo con más grosor.

Debido a este primer análisis de los resultados, se observa que las dos gráficas en las que se representan las rigideces frente a la altura de caída crítica son muy similares, manteniéndose las mismas posiciones relativas en cuanto al valor de las rigideces. Simplemente los valores de rigidez dinámica tienen un valor mayor respecto a la rigidez estática en todos los casos, guardando una proporción. Es por esta razón por lo que en la segunda fase no se ha realizado el ensayo de rigidez dinámica, ya que su aportación al análisis de los resultados es limitada una vez obtenido C_{est} , y se trata de un parámetro que no representa el comportamiento real de un parque infantil.

7.2 FASE 2

Esta fase comprende la fabricación de nueve muestras, de tres tipologías diferentes (tipo A, B y C), con tres espesores diferentes, y la posterior realización de los ensayos de determinación de la altura de caída crítica y del módulo de rigidez estático.

A la hora de realizar análisis de la segunda fase del trabajo, se han tenido en cuenta los resultados obtenidos en dichos ensayos para las muestras A, B y C de 40 mm de espesor. De esta forma se tienen alturas críticas de caída y rigideces estáticas

para cuatro espesores diferentes en cada muestra. Los espesores ensayados, además de los 40 mm de la primera fase, son 60, 80 y 100 mm.

A continuación, se realiza el análisis según la altura de caída crítica obtenida.

7.2.1 Altura de caída crítica

En este apartado se procede al análisis de los resultados de la altura de caída crítica obtenidos en función del espesor para cada tipo de muestra.

Lo que se ha intentado en primer lugar se entender el comportamiento individual de cada tipo de muestra, observando cómo evoluciona el amortiguamiento según se va incrementando el espesor. Para realizar una primera aproximación se ha realizado un gráfico que simula de forma continua la manera de evolucionar del amortiguamiento según el espesor. En estas gráficas se ha utilizado la herramienta de Excel para añadir una curva de tendencia de tipo polinómica, de la cual podría obtenerse una ecuación que describiera matemáticamente la evolución de la altura de caída crítica al variar del espesor. Con esta ecuación se podría calcular de forma aproximada, según los resultados obtenidos, la altura de caída crítica para el espesor deseado de cada tipo de muestra ensayado.

Para construir estas curvas se han tenido en cuenta los datos de todos los ensayos de altura de caída crítica, utilizando los valores medio y su desviación. Se ha tomado también el punto 0,0, es decir, que cuando no existe espesor del material, no existe amortiguamiento, lo que podría ser el caso de la solera de hormigón sobre la que se instalan habitualmente los parques infantiles, con una rigidez mucho mayor que la del caucho continuo, considerándose que sin el pavimento de seguridad no hay amortiguamiento.

Los resultados obtenidos al aplicar la ecuación, tendrán mayor una mayor validez en el rango de resultados ensayados, es decir, para espesores entre 40 y 100 mm, ya que ajustará mejor en esos puntos

La principal utilidad de la obtención de este tipo de curvas se daría a la hora de diseñar un parque infantil. Mediante la realización de ensayos de altura de caída crítica sobre muestras de la misma tipología, es decir, mismo tipo de materiales y dosificaciones, variando únicamente el espesor, se podría obtener una curva que caracterizase de una forma bastante aproximada el comportamiento frente a amortiguamiento de ese material en concreto. De esta forma, a la hora de plantearse el proyecto de construcción de un parque infantil, una vez decididos los elementos de juego a instalar y con ello su altura de caída libre y la superficie necesaria del área de impacto, con una curva de este tipo facilitada por el fabricante, se podrían obtener los espesores necesarios y la superficie requerida, de manera que se obtendría la necesidad real de material a instalar.

En la siguiente figura se representan las alturas de caída crítica de las muestras A (4), A-6, A-8, y A-10. Todas estas muestras están fabricadas con una capa superficial de 10 mm de EPDM y mismas proporciones de resina como ligante, y otra

capa de SBR con tamaño de grano entre 2 y 7 mm y mismo porcentaje de resina en peso, variando únicamente el espesor de esta capa de 20 en 20 mm.

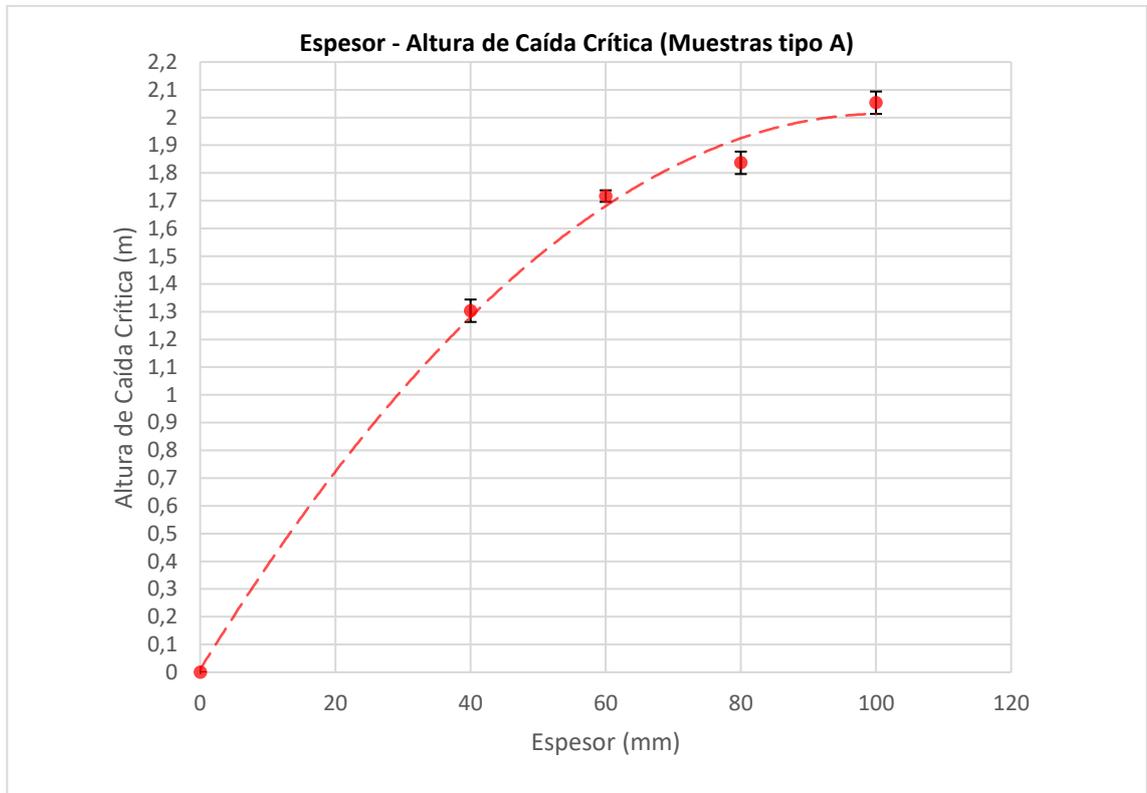


Figura 7-6 Curva Espesor - Altura de Caída Crítica en muestras tipo A.

En la siguiente figura se representan las alturas de caída crítica de las muestras B (4), B-6, B-8, y B-10., que de manera análoga a las muestras tipo A, de una muestra a la siguiente tan sólo varía el espesor de la capa formada por SBR con granulometría 1-4 mm en 20 mm.

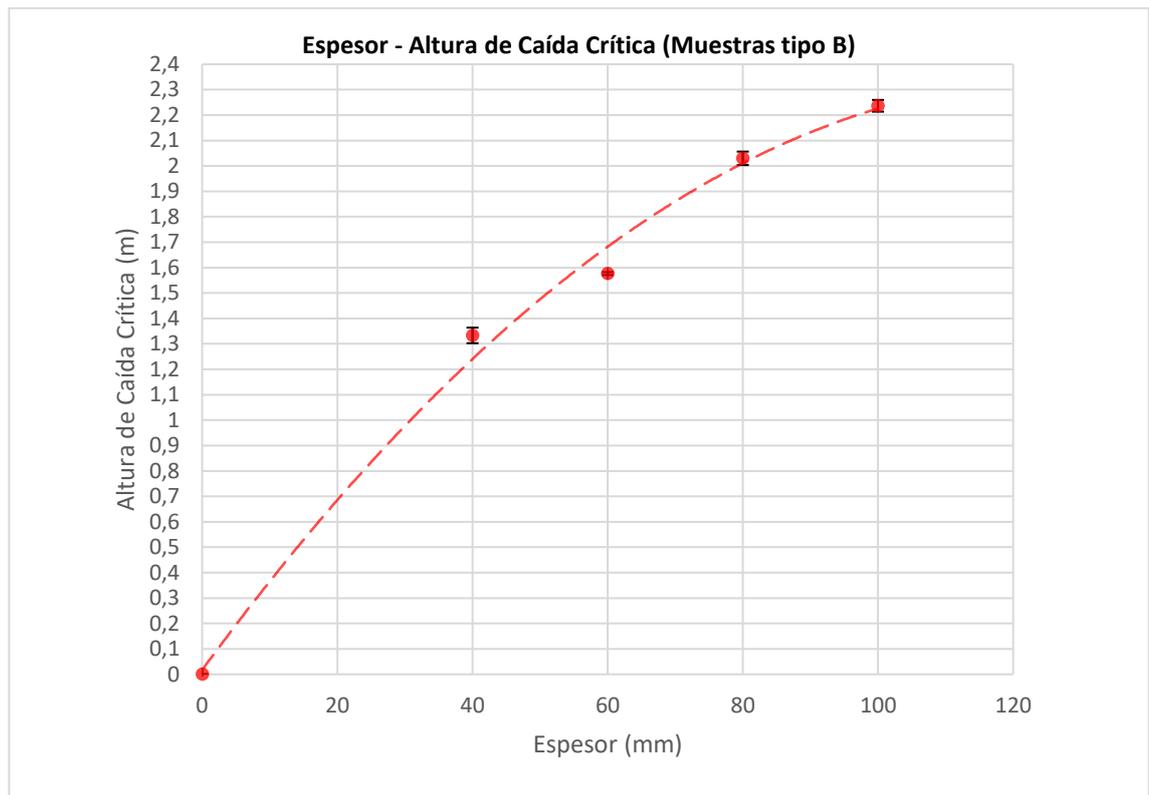


Figura 7-7 Curva Espesor - Altura de Caída Crítica en muestras tipo B.

Por último, se representan en la siguiente figura las alturas de caída crítica de las muestras C (4), C-6, C-8, y C-10., que de igual forma que en las muestras del tipo A y B, tan sólo varía que el espesor de la capa formada por SBR con tamaño de grano entre 0.5 y 2.5 mm se incrementa en 20 mm de una muestra a la del espesor inmediatamente superior.

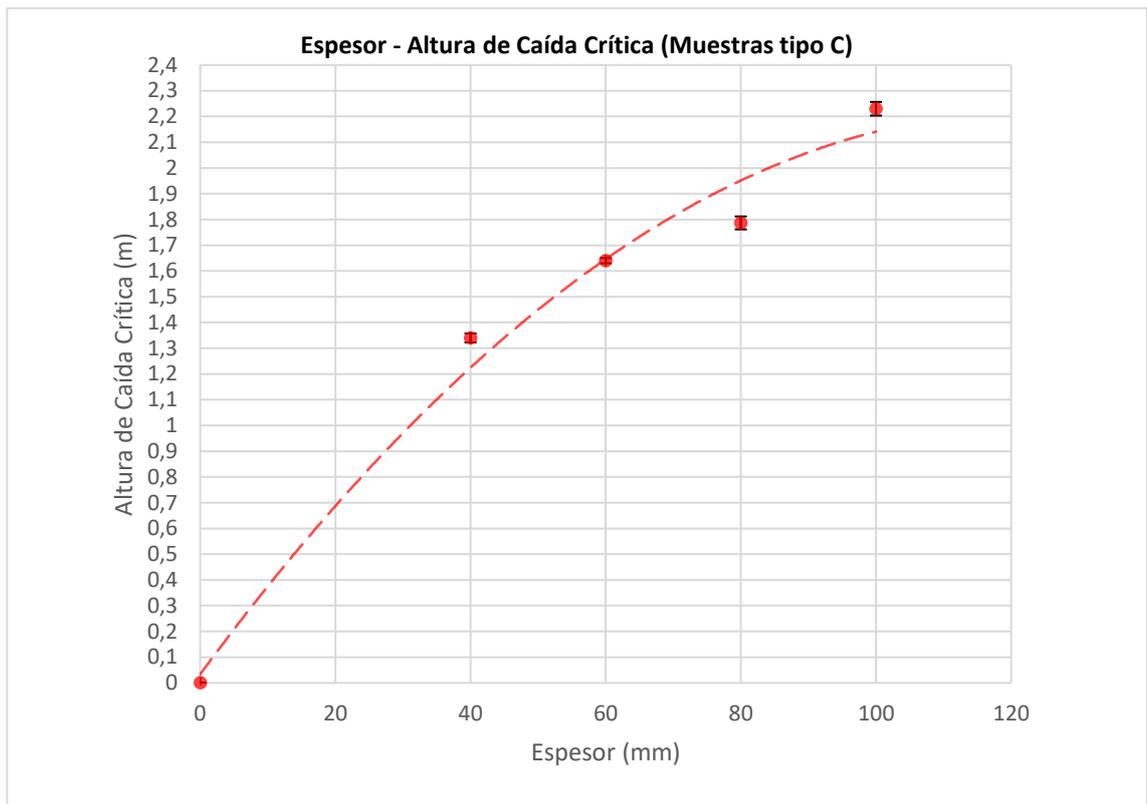


Figura 7-8 Figura 2 Curva Esesor- Altura de Caída Crítica en muestras tipo C.

A continuación, se muestran los gráficos agrupados, de manera que se puede observar el comportamiento global frente a amortiguamiento de cada tipo de muestra.

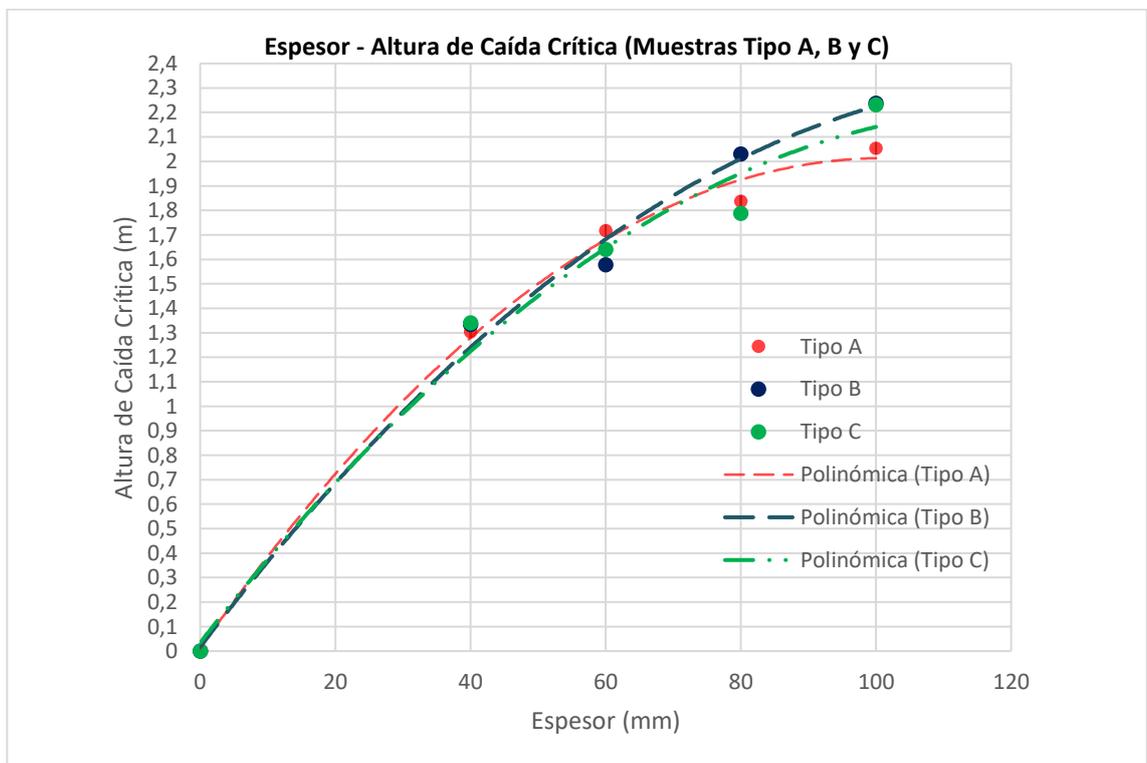


Figura 7-9 Curvas Esesor - Altura de Caída Crítica en muestras tipo A, B y C.

El comportamiento general de todas las curvas es similar, ya que se ve cómo los valores de amortiguación crecen al aumentar el espesor de las muestras, pero según nos acercamos a mayores espesores, el incremento de la altura de caída crítica es cada vez menos notable.

En la serie formada por las muestras tipo A, este efecto parece más acusado, de manera que en la gráfica se observa que la curva generada que trata de simular el desarrollo, para el espesor de 100 mm tiene una pendiente muy baja, de manera que es posible que al ensayar muestras con espesores cada vez mayores llegue un momento en el que un incremento del espesor no implique un mayor amortiguamiento.

Por otro lado, en el primer tramo de la curva (puntos no ensayados entre 0 y 40 mm de espesor), el comportamiento previsto según la curva es muy similar para los tres tipos de muestras. Este comportamiento es previsible al tener únicamente ensayadas en ese intervalo muestras con 40 mm de espesor que han obtenido resultados muy similares, del orden de 1.30 m de altura de caída crítica.

Atendiendo a la línea de tendencia generada, a partir de este punto, las muestras siguen en primera instancia un comportamiento parecido, que se va disipando a medida que aumentan los espesores, comenzándose a cruzarse las curvas.

Si se obtiene un buen ajuste en las curvas, que se aproxime fielmente a la realidad física, al comparar el comportamiento de diferentes muestras, si las funciones se cortasen podría discretizarse el resultado por tramos en los que un tipo de material para un determinado intervalo de espesores es el que obtiene mejores resultados de amortiguamiento. Si, por el contrario, las curvas no se cortan, eso implica que un tipo de material tiene mejor comportamiento frente a la absorción de impactos que el resto para todos los espesores estudiados.

Las curvas obtenidas en este ajuste no reflejan lo que ocurre en la realidad, ya que los resultados obtenidos en los ensayos de determinación de la altura de caída crítica de las diferentes muestras hacen que varíen en gran medida los resultados de una muestra a otra.

En la siguiente figura se observa lo comentado anterior al representar el espesor frente al amortiguamiento, y uniendo con una recta la serie de puntos obtenidos para cada muestra.

Existen dos comportamientos llamativos que pueden observarse en la gráfica. Uno es el gran incremento de amortiguamiento que se produce al pasar de la muestra B-6 a la muestra B-8. El otro es incremento de la altura de caída crítica experimentado entre la muestra C-8 y la C-10.

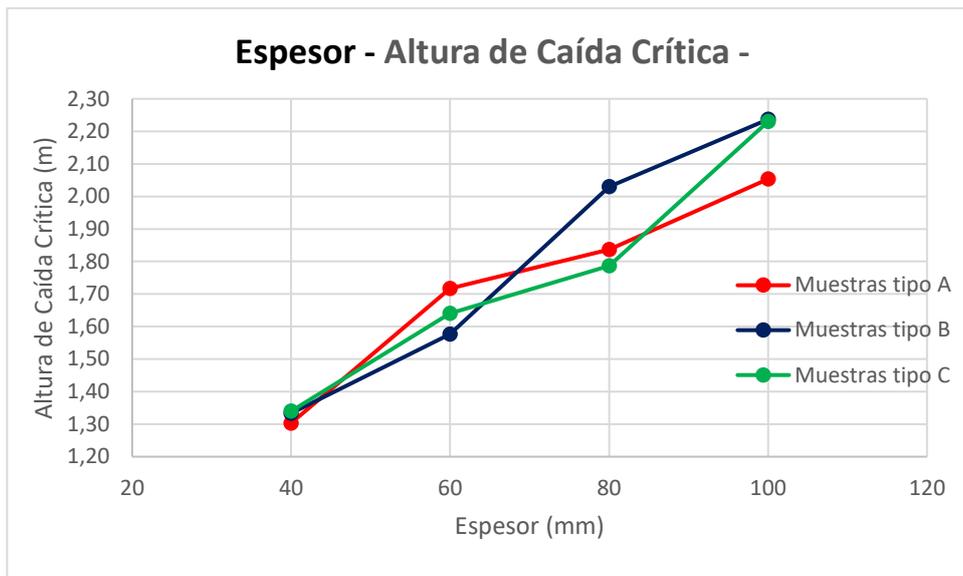


Figura 7-10 Espesor - Altura de Caída Crítica en muestras tipo A, B y C.

Si examinamos los resultados atendiendo a los resultados numéricos, y no a la simplificación realizada con las curvas, se obtienen los incrementos de amortiguación y material de una muestra respecto a la de espesor inmediatamente inferior. Los datos se recogen en la siguiente tabla, en el caso del incremento de altura de caída crítica tanto de forma porcentual como cuantitativa respecto a la muestra de espesor inmediatamente anterior y respecto a la muestra de menor espesor.

En la tabla se designa la altura de caída crítica como hCC, y el espesor como E.

Muestras tipo A			Incrementos respecto a la muestra anterior			Incrementos respecto a la muestra A-4		
Muestra	Espesor E (mm)	hCC (m)	ΔE (%)	ΔHCC (%)	ΔhCC (m)	ΔE (%)	ΔhCC (%)	ΔhCC (m)
A-4	40	1,30	-	-	-	-	-	-
A-6	60	1,72	50,00	31,71	0,41	50,00	31,71	0,41
A-8	80	1,84	33,33	6,99	0,12	100,00	40,92	0,53
A-10	100	2,05	25,00	11,80	0,22	150,00	57,54	0,75

Muestras tipo B			Incrementos respecto a la muestra anterior			Incrementos respecto a la muestra B-4		
Muestra	Espesor E (mm)	hCC (m)	ΔE (%)	ΔHCC (%)	ΔhCC (m)	ΔE (%)	ΔhCC (%)	ΔhCC (m)
B-4	40	1,33	-	-	-	-	-	-
B-6	60	1,58	50,00	18,25	0,24	50,00	18,25	0,24
B-8	80	2,03	33,33	28,75	0,45	100,00	52,25	0,70
B-10	100	2,24	25,00	10,18	0,21	150,00	67,75	0,90

Muestras tipo C			Incrementos respecto a la muestra anterior			Incrementos respecto a la muestra C-4		
------------------------	--	--	---	--	--	--	--	--

Muestra	Espesor E (mm)	hCC (m)	ΔE (%)	ΔHCC (%)	ΔhCC (m)	ΔE (%)	ΔhCC (%)	ΔhCC (m)
C-4	40	1,34	-	-		-	-	-
C-6	60	1,64	50,00	22,39	0,30	50,00	22,39	0,30
C-8	80	1,79	33,33	8,94	0,15	100,00	33,33	0,45
C-10	100	2,23	25,00	24,81	0,44	150,00	66,42	0,89

Tabla 7-1 Incrementos de amortiguación y de material para las muestras del tipo A, B y C

La evolución del amortiguamiento al aumentar el espesor en las muestras tipo A es progresiva. En el primer cambio, cuando pasa de 40 a 60 mm, con un 50% más de material mejora el amortiguamiento 41 cm, que es más de un 30%. En los dos siguientes aumentos de espesor, la hCC crece en menor medida.

La muestra tipo A comienza con una altura de caída libre similar al resto con 40 mm de espesor. Es la muestra que más amortigua para el primer incremento de espesor, con 60 mm. Sin embargo, finalmente es la muestra que para el espesor de 100 mm ofrece peores propiedades amortiguadoras, con valores significativamente inferiores a los de las otras dos muestras, con 18 y 19 cm de hCC menos.

En las muestras de 80 mm de espesor se producen diferencias significativas entre la muestra B-8, que alcanza ya los 2 metros de hCC, y las A-8 y C-8 que se encuentran sobre 1.80 m.

Por otra parte, los incrementos más significativos de hCC se producen en el paso de B-6 a B-8, aumentando 45 cm la altura de caída crítica, y en el cambio de C-8 a C-10, creciendo la hCC en 44 cm. Son resultados sorprendentes si lo comparamos con las muestras del tipo A, ya que no se producen en el primer aumento de espesores de la muestra.

Una posible explicación a este fenómeno, es que las muestras formadas con la granulometría más gruesa, las del tipo A, desarrolla su amortiguación más rápidamente con espesores menores, dejando pequeños síntomas (la curva simulada) de que el aumento de su amortiguamiento tiende a la estabilización a medida que se aumenta el espesor. Por su parte, las muestras de granulometría intermedia, tipo B, dan muestras del mismo comportamiento, pero aparece en un escalón de espesor mayor, en el paso de 60 a 80 mm de espesor, y se reduce en el siguiente paso, siendo probable que con muestras de 120 mm de espesor comenzara a reducirse en gran medida el crecimiento de la amortiguación, para irse estabilizando con espesores aún mayores. Siguiendo en la misma línea, es previsible que ocurra lo mismo con las muestras del tipo C, las que tienen la granulometría más fina. La muestra C sufre el mayor incremento de amortiguamiento en el paso de la muestra de 80 mm a la de 100 mm, últimas muestras ensayadas. Por lo que, si se siguiera la tendencia, para muestras de mayor espesor el crecimiento de la altura de caída crítica debiera de ser menor, e ir estabilizándose hasta que llegue un espesor con el que no aumente prácticamente la hCC.

Por lo tanto, según lo analizado y las posibles hipótesis explicativas, de los ensayos de altura de caída crítica realizados en la fase 2 se concluye lo siguiente.

- Debiera ser posible simular el comportamiento de un pavimento de seguridad de caucho continuo frente a la absorción de impactos mediante la realización de varios ensayos, ajustando con la curva adecuada los resultados obtenidos.

Si un fabricante caracterizara de forma adecuada sus materiales, es posible obtener curvas con las que poder escoger los espesores necesarios para la instalación de pavimentos de caucho continuo de unas características específicas (u otro material).

Con estudios que obtuvieran este tipo de curvas con resultados que guardaran una mejor relación que las obtenidas en este trabajo, sería posible implementar un método para el diseño de parques infantiles de manera que se optimice el uso de materiales para el revestimiento de superficies.
- De los prototipos ensayados, las que obtienen mejores propiedades de amortiguación son las muestras B-10 y C-10, con valores muy similares, y significativamente mejores que la siguiente, la A-10.
- Se obtienen resultados similares para la muestra con mayor espesor del tipo A, la A-10, que para la B-8. Es decir, con 20 mm menos de SBR y resina, tiene la misma capacidad amortiguadora.
- Lo anterior implica que las muestras del tipo A, para 10 cm de espesor han comenzado a estabilizar la mejora de propiedades amortiguadoras a base de incluir material en su capa inferior.

Se concluye que existe un espesor para cada tipo de muestra, al cual no se ha llegado con la realización de este trabajo, para el cual un incremento del espesor de la muestra ensayada no implica un incremento en la altura de caída crítica, que, si el objetivo es aumentar la hCC, implica desaprovechar el material al instalarlo.

Por lo tanto, las curvas que pueden definir el comportamiento de la amortiguación frente al espesor en un material concreto, tienen que tener una asíntota horizontal que limite la altura de caída crítica .

7.2.2 Ensayos de rigidez

Se vuelven a realizar los ensayos de rigidez estática según lo descrito en el apartado 5.1.2y se obtiene el módulo de rigidez estática C_{est} para cada muestra.

De forma análoga a lo analizado en el apartado anterior, se estudian los valores obtenidos para cada serie de tipología de probetas, incluyendo la muestra correspondiente de 40 mm de la fase 1.

En la siguiente gráfica se representan conjuntamente la rigidez estática frente al espesores de las muestras. Se unen con una línea los puntos pertenecientes a un mismo material.

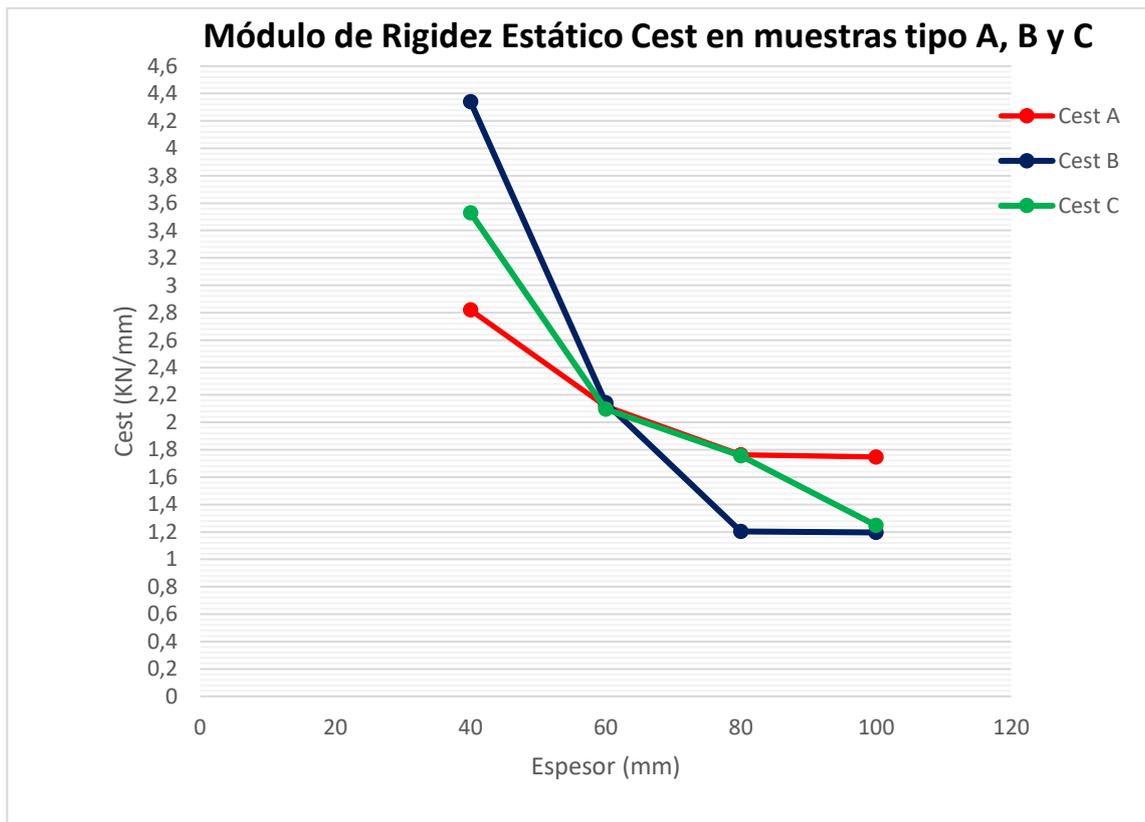


Figura 7-11 Espesor - Módulo de rigidez estática Cest en muestras tipo A, B y C.

Por lo que se observa en la gráfica, existe una relación entre la rigidez de las muestras y su espesor, al menos hasta cierto punto. Al aumentar el espesor de la muestra de pavimento de seguridad, su rigidez también aumenta. Esta circunstancia está más acentuada cuando la cantidad de material que se aporta respecto a la existente en la muestra es mayor, es decir, el cambio de rigidez es mayor entre las muestras de 40 y 60 mm de espesor, que entre las de 80 y 100 mm.

De hecho, en dos de los tres tipos de muestras, la A y la B, la rigidez estática se estabiliza, apenas variando entre las dos muestras con mayor espesor. Esta circunstancia no se llega a dar en la muestra C, pero es presumible que en caso de que se hubieran ensayado muestras de mayor espesor (si se hubiera continuado con otra muestra de 120 mm de espesor), el resultado de rigidez estática tendería a ser el obtenido para la muestra de mayor grosor ensayado, y en las otras dos muestras continuaría el mismo resultado habiéndose estabilizado la rigidez y no teniendo ya más influencia el espesor respecto a al módulo de rigidez estática.

En la siguiente tabla se presentan cuantitativamente los decrementos de rigidez al aumentar la cantidad de material en las muestras.

Muestras tipo A					
Muestra	Espesor (mm)	Cest (KN/mm)	Δ material (%)	Δ Cest (%)	Δ Cest (KN/mm)
A-4	40	2,82	-	-	-
A-6	60	2,12	50,00	-24,95	-0,70
A-8	80	1,76	33,33	-16,75	-0,35
A-10	100	1,75	25,00	-0,82	-0,01

Muestras tipo B					
Muestra	Espesor (mm)	Cest (KN/mm)	Δ material (%)	Δ Cest (%)	Δ Cest (KN/mm)
B-4	40	4,34	-	-	
B-6	60	2,14	50,00	-50,64	-2,20
B-8	80	1,20	33,33	-43,84	-0,94
B-10	100	1,20	25,00	-0,56	-0,01

Muestras tipo C					
Muestra	Espesor (mm)	Cest (KN/mm)	Δ material (%)	Δ Cest (%)	Δ Cest (KN/mm)
C-4	40	3,53	-	-	
C-6	60	2,10	50,00	-40,59	-1,43
C-8	80	1,76	33,33	-16,27	-0,34
C-10	100	1,25	25,00	-28,95	-0,51

Tabla 7-2 Incrementos del módulo de rigidez estática y de material para las muestras del tipo A, B y C.

Por lo tanto, en cuanto a la rigidez estática se concluye:

- Cuanto menor sea el espesor, mayor será el módulo de rigidez estática, y cuanto mayor sea espesor, menor será la rigidez.
- Las variaciones de rigidez son más notorias cuando el espesor es menor.
 Por esta razón, si en la parte experimental del trabajo se hubieran empleado muestras de menor espesor, los cambios de rigideces hubieran sido más notables, es decir, la rigidez tiende a infinito al disminuir el espesor.

Por último, se relacionan los resultados de rigidez con los de amortiguamiento. Se muestran en la siguiente gráfica la serie de datos de los tres tipos de muestras a analizar.

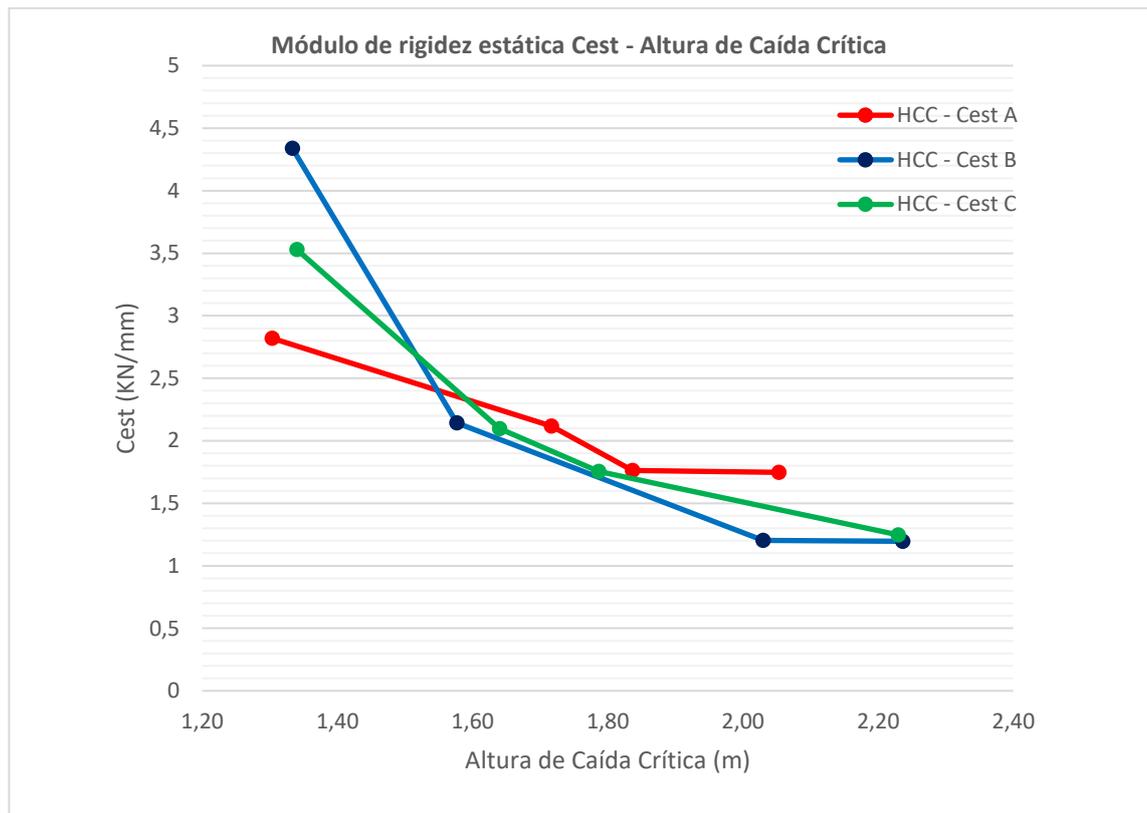


Figura 7-12 Altura de caída crítica - Módulo de rigidez estática Cest en muestras tipo A, B y C.

Por lo que se observa en la gráfica, existe una relación entre los resultados de ambos ensayos, al menos atendiendo al análisis en función de la tipología.

Para cada tipología de material ensayado, se sigue la tendencia de que disminuir la rigidez al aumentar la altura crítica de caída, es decir, disminuye la rigidez al aumentar el amortiguamiento.

En cambio, si se analizan los datos en conjunto, se observa que existen muestras que son más rígidas y a la vez amortiguan más que otras, como es el caso de la muestra A-6 respecto a la B-6 y C-6.

Por lo tanto, respecto a la relación entre los ensayos de rigidez y los de determinación de la altura de caída libre:

- Existe una relación entre la rigidez y el amortiguamiento si se analiza cada tipo de muestra por separado. En todas las series de datos, según aumenta la altura de caída crítica, la rigidez disminuye, y viceversa.
- Para las muestras ensayadas, no es posible encontrar una correlación entre los resultados de altura de caída crítica y módulo de rigidez estática, al menos para todo el intervalo de espesores ensayados. Esto se debe a que, en dos de las tres muestras ensayadas, el incremento de C_{est} entre los dos últimos espesores tiende a cero, previsiblemente no produciéndose variaciones para espesores mayores.

Por el contrario, los valores de altura crítica de caída siguen aumentando ante un mayor espesor, aunque cada vez de forma menos acentuada, de manera que si se ensayaran muestras con mayor altura la amortiguación aumentaría.

Por lo tanto, para esos rangos de espesores se evidencia que es imposible establecer una correlación entre ensayos, de manera que no se puede obtener un parámetro al conocer el otro.

7.3 CONCLUSIONES TÉCNICAS

En esta parte se agrupan las ideas más importantes obtenidas del análisis de los resultados obtenidos en los ensayos.

- Las muestras B-10 y C-10 son las que obtienen mayores alturas de caída crítica, por lo tanto, son los pavimentos que presentan mejores propiedades amortiguadoras. A su vez, son los de mayor espesor, pero existiendo diferencias significativas con la muestra A-10 del mismo espesor.
- La altura de caída crítica aumenta con el espesor de las muestras: En los ensayos realizados sobre la serie de muestras que conforma la segunda fase, se observa que, para cada tipología de muestra, un aumento del espesor supone un incremento de la amortiguación.
- La altura de caída crítica tiende a estabilizarse con espesores caucho continuo mayores: De forma análoga a la rigidez, el crecimiento del amortiguamiento de las muestras es cada vez menor, pero para todos los incrementos de espesor se produce un aumento de la altura de caída crítica apreciable. Con las muestras ensayadas en este proyecto tan sólo puede observarse esa tendencia, siendo necesaria la realización de ensayos con mayores espesores para determinar el punto para cada muestra en el que un aumento de espesor no entrañe un incremento de la capacidad amortiguadora del pavimento.
- La rigidez disminuye con el espesor de las muestras: De los ensayos de rigidez realizados se observa que un incremento del espesor de un tipo de muestra implica el decremento del C_{est} . Para los cambios de espesor de 80 a 100 mm en las muestras del tipo A y B la rigidez se estabiliza.
- Mayor amortiguamiento implica menor rigidez y viceversa: Por lo general, para ciertos rangos de espesores se cumple que, a mayor amortiguamiento, es decir, mayor altura de caída crítica, los valores del módulo de rigidez C_{est} son menores.
- La correspondencia entre ensayos en la fase 1 sólo se observa entre la probeta E con el peor amortiguamiento, y el resto de probetas que tienen resultados más parejos de amortiguamiento.
- No existe una correlación directa entre los resultados de rigidez y altura de caída crítica:

Para la serie de muestras ensayadas, no se puede establecer una ley que permita calcular la altura de caída crítica a partir de su rigidez, ya que hay intervalos de espesor en los que un ensayo deja de variar el resultado, mientras que en el otro aún sigue habiendo un aumento de la capacidad aborbedora de impactos.

- El ensayo de determinación de la altura de caída crítica es más sensible para la medida de la amortiguación que el ensayo de rigidez estática.: Para incrementos de espesores en las muestras de mayor grosor ensayadas, un ensayo varía sus resultados y el otro se estabiliza.

- Posibilidad de desarrollar una metodología para el cálculo de espesores en el diseño de áreas de juego infantil con pavimentos de seguridad de caucho continuo.

Con la obtención de resultados de amortiguación de muestras de una misma tipología y diferentes espesores, se podrían obtener curvas que simulen el comportamiento real del cambio de altura crítica de caída al realizar variaciones en el espesor. Esto permitir a fabricantes disponer para cada producto deseado, una relación que permita calcular el espesor en función de la altura de caída libre de un determinado elemento de juego en un parque, para así cumplir con los niveles de seguridad requeridos en un parque infantil.

8 ANÁLISIS ECONÓMICO

En el presente apartado se realiza un pequeño análisis económico de las diferentes alternativas de pavimentos de seguridad de caucho continuo empleadas. De esta forma se pretende complementar el análisis técnico realizado en el apartado 7, tratando de realizar una cuantificación económica atendiendo a los resultados obtenidos en los ensayos realizados, y en función de cada muestra.

En primer lugar, se ha procedido al cálculo del coste del material empleado, a partir de los datos facilitados por el fabricante.

A efectos de análisis económico de las diferentes alternativas, únicamente se ha comparado atendiendo al coste del material empleado, considerando que los precios de puesta en obra son prácticamente iguales en todos los casos, al igual que los costes de mantenimiento durante la vida útil del pavimento de seguridad de caucho continuo.

8.1 ESTIMACIÓN DEL COSTE DEL MATERIAL DE CADA MUESTRA.

Para poder realizar el análisis económico, es preciso obtener un precio del material estimado para cada tipo de muestra, de manera que posteriormente se puedan comparar económicamente las diferentes muestras en función de los resultados.

No se ha podido facilitar un precio de cada muestra individualmente, por lo que con los datos disponibles se ha realizado un procedimiento de cálculo hasta obtener un precio estimado del metro cuadrado de material para cada muestra.

8.1.1 DATOS DE PARTIDA

8.1.1.1 Precio del material

El fabricante de las muestras ha facilitado una relación de precios estimados para cada material empleado en la elaboración de las muestras. Para el cálculo se han utilizado los precios de la siguiente tabla.

PRECIOS DEL MATERIAL	
Material	€/t
SBR	240
Paja	150
EPDM	1800
Resina	2900
Imprimación	3900

Tabla 8-1 Precios materiales empleados (Fuente: Vulgalia)

Para la fabricación de la capa inferior de las probetas se ha empleado tres granulometrías diferentes. Se especifica un único precio para el SBR, por lo que las diferencias de coste en este material quedan supeditados a el peso de esta capa.

8.1.1.2 Masa de las probetas

En la realización de los ensayos de rigidez de la fase 1, se procedió en el laboratorio de LADICIM al pesado de cada una de las ocho muestras que componían la primera parte del trabajo.

A partir del peso de las muestras se puede calcular aproximadamente el peso de cada material empleado.

A continuación, se indica la masa para cada muestra de la fase 1.

MASA MUESTRAS FASE 1	
Muestra	Masa (kg)
A	7,08
B	7,24
C	7,52
D	7,6
E	6,64
F	6,66
G	7,56
H	7,34

Tabla 8-2 Masa de las muestras Fase 1 (Fuente: LADICIM)

En la fase 2 no se ha realizado el pesado de las muestras, por lo que el cálculo de los costes se hace en base a la masa de las muestras de la fase 1.

8.1.1.3 Peso específico

El fabricante de las muestras también ha facilitado los valores de peso específico de los materiales de caucho empleados.

PESO ESPECÍFICO ESTIMADO	
Material	Peso específico (g/cm ³)
SBR	1,21
EPDM	1,55

Tabla 8-3 Peso específico del caucho empleado (Fuente: Vulgalia)

Con el peso específico del SBR y de EPDM, se puede

8.1.1.4 Características de las muestras

En el apartado 5.2 se presenta la relación de las muestras, así como las características de cada una de ellas. Se especifica el espesor y la composición de las dos capas que forman cada una de las muestras.

A continuación, se presenta un resumen de las características de cada una de las muestras, diferenciando entre las dos fases.

ESPECIFICACIONES DE LAS MUESTRAS FASE 1							
		Capa Superficial			Capa Base		
Muestra	Dimensiones (mm))	Espesor (mm)	Material	Ligante	Espesor (mm)	Material (granulometría en mm)	Ligante
A	500 X 500	10	EPDM	Resina al 18 % del peso	30	SBR (2-7)	Resina al 15 % del peso
B						SBR (1-4)	
C						SBR (0,5-2,5)	
D						SBR (2-7 + 1-4)	
E						SBR (0,5-2,5) + paja	
F						SBR (2-7) con ahorros	
G						SBR (2-7 + 1-4 + 0,5-2,5)	
H						SBR (1-4 + 0,5-2,5)	

ESPECIFICACIONES DE LAS MUESTRAS FASE 2							
		Capa Superficial			Capa Base		
Muestra	Dimensiones (mm))	Espesor (mm)	Material	Ligante	Espesor (mm)	Material (granulometría en mm)	Ligante
A-6	500 X 500	10	EPDM	Resina al 18 % del peso	50	SBR (2-7)	Resina al 15 % del peso
A-8					70		
A-10					90		
B-6					50	SBR (1-4)	
B-8					70		
B-10					90		
C-6					50	SBR (0,5-2,5)	
C-8					70		
C-10					90		

Tabla 8-4 Resumen de las características de las muestras empleadas en la fase 1 y 2
(Fuente: elaboración propia)

8.1.2 METODOLOGÍA ADOPTADA PARA LA ESTIMACIÓN DEL COSTE

A partir de los datos de partida presentados en el apartado anterior, se ha realizado una aproximación para calcular los precios de cada muestra.

Se diferencian dos tipos de cálculos en función de la fase.

- En la fase 1 se tienen ocho muestras de las cuales se conoce la masa, por lo que se calcula el precio de cada muestra directamente.
- En la fase 2 se tienen tres tipos de muestras diferentes que se corresponden a las características de las muestras A, B y C de la primera fase, modificándose el espesor. De esta forma, se utilizan los datos obtenidos para el cálculo de dichas muestras en la fase 1, calculando el coste para la variación del espesor de la capa inferior, que es la única parte que cambia.

El objetivo final es obtener el coste de cada muestra, fijando como parámetro representativo del coste por m² de material. Para ello es necesario realizar una estimación de la masa de cada componente de las muestras, que una vez calculada y

conocidos los precios por unidad de masa de los materiales empleados en la fabricación de las muestras, permita fácilmente obtener el coste por metro cuadrado de cada muestra.

8.1.2.1 Hipótesis adoptadas

De las características de las muestras escogidas para la realización de ensayos, se pueden adoptar las siguientes consideraciones para el cálculo:

- La capa superior es igual para todas las muestras, tanto para la primera como de la segunda fase. De esto se deduce que el coste de material para la fabricación de todas las muestras es el mismo, por lo que la masa de esta capa será igual para todos los casos.
- El cálculo de la masa de cada capa de las muestras no se puede hacer directamente, por lo que se calcula de forma aproximada. De acuerdo a lo descrito en el párrafo anterior, la masa de la capa superior es la misma para todas las muestras, por lo que se ha decidido realizar una estimación del peso de dicha capa, y obtener el de la otra capa restando este peso del peso total para cada muestra.
- Considerar que la capa superior es la cuarta parte del peso de las muestras de 40 mm de espesor sería la simplificación más sencilla, pero se aleja algo de la realidad ya que el SBR y el EPDM tienen diferentes pesos específicos, siendo el del EPDM mayor, por lo que se reduciría el peso que le corresponde a la capa superior.
 Al disponer de los pesos específicos, se ha tratado de calcular con una estimación más realista, homogeneizando la sección de la muestra de caucho mediante el factor $\frac{Y_{SBR}}{Y_{EPDM}} = \frac{1.21}{1.55}$, estimando que cada capa está formada en primera instancia solo por SBR o EPDM.
 Con esta relación se puede plantear el siguiente sistema de ecuaciones que da solución aproximada al problema planteado:

$$\begin{cases} m_{Muestra} = m_{Capa Superficial} + m_{Capa Base} \\ m_{Muestra} = m_{EPDM} \times \left[1 + \frac{e_{SBR}}{e_{EPDM}} \times \frac{Y_{SBR}}{Y_{EPDM}} \right] \end{cases}$$

Donde:

- $m_{Muestra}$ es la masa total de la muestra.
- $m_{Capa Superficial}$ es la masa de la capa superior formada por EPDM.
- $m_{Capa Base}$ es la masa de la capa inferior formada por SBR.
- e_{EPDM} es el espesor de la capa superficial.
- e_{SBR} es el espesor de la capa base.
- Y_{EPDM} es el peso específico del EPDM

- Y_{SBR} es el peso específico del SBR.

De los cuales son todos valores conocidos de acuerdo a los datos de partida, excepto la masa de la capa superior e inferior, por lo que se pueden calcular aplicándose a las muestras de 40 mm de espesor (fase 1).

- Para el cálculo del peso de la capa superior, se ha decidido realizar considerando el peso medio de las probetas A, B y C. Esto se aplica ya que estas son las muestras cuya capa inferior es más homogénea (sólo tienen una granulometría).

$$m_{Muestra} = 7.28 \text{ kg}$$

- A partir de las especificaciones de los materiales, una vez conocida la masa de cada capa, se puede proceder al cálculo de la cantidad de EPDM, SBR y resina en función del porcentaje de resina en peso para cada capa

Con los siguientes sistemas de ecuaciones se pueden calcular dichas necesidades de material para cada capa, conocido el porcentaje de resina en peso para cada caso.

$$\begin{cases} m_{Capa\ Superficial} = m_{EPDM} + m_{Resina\ Capa\ Superficial} \\ m_{Resina\ Capa\ Superficial} = m_{EPDM} \times \frac{\% \text{ Resina Capa Superficial}}{100} \end{cases}$$

Donde:

- $m_{Capa\ Superficial}$ es la masa de la capa superior formada por EPDM.
- m_{EPDM} es la masa de EPDM empleada en la capa superior.
- $m_{Resina\ Capa\ Superficial}$ es la masa resina en la capa superior.
- $\% \text{ Resina Capa Superficiales}$ el porcentaje de resina en peso del material que forma la capa superior (EPDM) que se emplea para ligar la capa superior.

$$\begin{cases} m_{Capa\ Base} = m_{SBR} + m_{Resina\ Capa\ Base} \\ m_{Resina\ Capa\ Base} = m_{SBR} \times \frac{\% \text{ Resina Capa Base}}{100} \end{cases}$$

Donde:

- $m_{Capa\ Base}$ es la masa de la capa superior formada por SBR.
- m_{SBR} es la masa del SBR empleada en la capa inferior.
- $m_{Resina\ Capa\ Base}$ es la masa resina en la capa inferior.
- $\% \text{ Resina Capa Base}$ es el porcentaje de resina en peso del material que forma la capa inferior (SBR) que se emplea para ligar la capa inferior.

- En la fase 2 lo que realmente se está haciendo al pasar de una muestra a la de siguiente espesor, es aumentar 20 mm el espesor del SBR, quedando el resto de variables fijo.
 Por este motivo, basándose en la aproximación de las muestras A, B y C, se ha estimado el valor de los pesos de 20 mm de cada tipo de capa base formada por SBR, y se han aumentado en esa cantidad las demandas de material para cada incremento de espesor.
- Llegados a este punto, y siguiendo lo descrito, al haber utilizado como dato la masa de la muestra en kilogramos, se estarían obteniendo las necesidades de material en kilogramos para fabricar una muestra de las mismas dimensiones que las ensayadas, de 500 mm x 500 mm.
 Es más representativo obtener el precio por metro cuadrado, por lo que habrá que hacer una pequeña transformación de los resultados multiplicando por 4 los valores obtenidos.
- Otras consideraciones:
 - Para el cálculo del peso por partes de la muestra F, que es la que presenta ahorros, no se ha realizado ninguna consideración especial, ya que al haber fijado con el criterio descrito la masa de la capa superior, dichos ahorros se traducen en una reducción de las necesidades de material de la capa inferior.
 - La muestra E presenta en la parte inferior SBR mezclado con paja. Para calcular las necesidades de paja se ha estimado un que la parte que le correspondería al SBR si no hubiera paja se reparte de manera que el SBR representa el 80% y la paja el 20%, aplicando el porcentaje en peso de la resina a la suma de las dos masas.
 - Se ha considerado como dotación habitual que la imprimación estará consistirá en 250 gramos por metro cuadrado, igual para las 17 muestras ensayadas.

8.1.2.2 Estimación de los pesos

Siguiendo lo anteriormente descrito, se obtienen los siguientes pesos para cada fase. A continuación, se recogen en dos tablas los resultados obtenidos.

Los resultados de las muestras A, B y C se reproducen en ambas tablas al pertenecer por un lado a la primera fase, y al ser las probetas que comienzan la serie de espesores de las tres tipologías en la segunda etapa, habiéndolas denominado para este caso como A-4, B-4 y C-4.

▪ Fase 1.

Muestras	Espesor (mm)	Capa superior		Imprimación (kg/m ²)	Capa inferior			Peso total (kg/m ²)
		EPDM (kg/m ²)	Resina (Kg/m ²)		SBR (Kg/m ²)	Resina (kg/m ²)	Peso paja (kg/m ²)	
A	40	7,38	1,33	0,25	17,05	2,56	-	28,57
B					17,61	2,64	-	29,21
C					18,58	2,79	-	30,33
D					18,86	2,83	-	30,65
E					12,41	2,33	3,10	26,81
F					15,59	2,34	-	26,89
G					18,72	2,81	-	30,49
H					17,95	2,69	-	29,61

Tabla 8-5 Relación de pesos necesarios de cada componente en muestras de la Fase 1 (Fuente: elaboración propia)

▪ Fase 2.

En la siguiente tabla, de forma análoga a la anterior, se presentan los resultados de la segunda fase, a los que se ha añadido los resultados de las muestras A, B y C con 40 mm de espesor al ser de la misma tipología.

Muestras	Espesor (mm)	Capa superficial		Imprimación (kg/m ²)	Capa base		Peso total (kg/m ²)
		EPDM (kg/m ²)	Resina (Kg/m ²)		SBR (Kg/m ²)	Resina (kg/m ²)	
A-4	40	7,38	1,33	0,25	17,05	2,56	28,57
A-6	60				28,42	4,26	41,64
A-8	80				39,78	5,97	54,71
A-10	100				51,15	7,67	67,78
B-4	40				17,61	2,64	29,21
B-6	60				29,34	4,40	42,71
B-8	80				41,08	6,16	56,21
B-10	100				52,82	7,92	69,70
C-4	40				18,58	2,79	30,33
C-6	60				30,97	4,64	44,57
C-8	80	43,35	6,50	58,82			
C-10	100	55,74	8,36	73,06			

Tabla 8-6 Relación de pesos necesarios de cada componente en muestras de la Fase 2 (Fuente: elaboración propia)

8.1.3 CÁLCULO DE COSTE ESTIMADO (€/m²)

A partir de los pesos obtenidos en el apartado anterior, y utilizando los precios indicados en el apartado 7.1.1.1., se calcula el precio por m² de cada muestra.

De forma análoga a los resultados de los pesos, a continuación, se muestran por fases las tablas transformadas a costes del material del pavimento de seguridad, desglosando por componentes que forman la muestra, y, dando el precio final estimado del material.

8.1.3.1 Fase 1

Muestras	Coste capa Superficial		Coste imprimación	Coste Capa Base			Coste total por muestra (€/m2)
	EPDM (€/m2)	Resina (€/m2)	Imprimación (€/m2)	SBR (€/m2)	Resina (€/m2)	Paja (€/m2)	
A	13,29	3,85	0,98	4,09	7,42	-	29,63
B				4,23	7,66	-	30,01
C				4,46	8,08	-	30,66
D				4,53	8,20	-	30,85
E				2,98	6,75	0,47	28,32
F				3,74	6,78	-	28,64
G				4,49	8,14	-	30,76
H				4,31	7,81	-	30,24

Tabla 8-7 Costes desglosados y total por m2 de las muestras de la fase 1 (Fuente: elaboración propia)

8.1.3.2 Fase 2

En los resultados de esta fase también se han incluidos los resultados correspondientes a las muestras A, B y C de la primera fase.

Muestras	Coste capa Superficial		Coste imprimación	Coste Capa Base		Coste total por muestra (€/m2)
	EPDM (€/m2)	Resina (€/m2)	Imprimación (€/m2)	SBR (€/m2)	Resina (€/m2)	
A-4	13,29	3,85	0,98	4,09	7,42	29,63
A-6				6,82	12,36	37,30
A-8				9,55	17,30	44,97
A-10				12,28	22,25	52,65
B-4				4,23	7,66	30,01
B-6				7,04	12,76	37,93
B-8				9,86	17,87	45,85
B-10				12,68	22,98	53,77
C-4				4,46	8,08	30,66
C-6				7,43	13,47	39,02
C-8				10,40	18,86	47,38
C-10				13,38	24,25	55,75

Tabla 8-8 Costes desglosados y total por m2 de las muestras de la fase 2 (Fuente: elaboración propia)

8.2 ANÁLISIS DE COSTES

En el apartado anterior se han estimado los costes descompuestos y totales de todas las muestras fabricada para su estudio en este trabajo.

A partir de estos resultados se puede comenzar a realizar el análisis económico, ya que ahora la variable del precio es conocida.

8.2.1 COSTES DESCOMPUESTOS POR MATERIALES. FASE 1.

Al haber obtenido los costes de cada componente implicado en la fabricación de los pavimentos de caucho ensayos, se puede estudiar la importancia de cada elemento.

Además, los pavimentos de caucho continuo se fabrican preparando dos capas bien diferenciadas, lo que puede entender fácilmente observando la siguiente tabla.

Muestras	Coste capa Superficial		Coste imprimación	Coste Capa Base			Coste Total (€/m ²)	Coste Capa Superficial (%)	Coste Capa Base (%)
	EPDM (%)	Resina (%)	Imprimación (%)	SBR (%)	Resina (%)	Paja (%)			
A	44,86	13,01	3,29	13,81	25,03	0,00	29,63	57,87	38,84
B	44,30	12,85	3,25	14,08	25,52	0,00	30,01	57,14	39,61
C	43,35	12,57	3,18	14,54	26,36	0,00	30,66	55,92	40,90
D	43,08	12,49	3,16	14,67	26,59	0,00	30,85	55,58	41,26
E	46,94	13,61	3,44	10,52	23,84	1,64	28,32	60,55	36,01
F	46,40	13,46	3,40	13,06	23,67	0,00	28,64	59,86	36,73
G	43,22	12,53	3,17	14,61	26,47	0,00	30,76	55,75	41,08
H	43,95	12,75	3,22	14,25	25,83	0,00	30,24	56,70	40,07

Tabla 8-9 Porcentaje respecto al coste total de los materiales descompuestos, y de las capas. Fase 1 (Fuente: elaboración propia)

En la tabla se representan los porcentajes, respecto al coste total, de cada tipo de material empleado en cada muestra fabricada en la primera fase. Con este indicador se puede apreciar la importancia económica de cada componente para las muestras de caucho fabricadas de 40 mm de espesor.

En general, la distribución de los costes es similar para todas las probetas, con alguna particularidad en las muestras E y F que se comentará más adelante.

A continuación, se analiza cada componente.

8.2.1.1 EPDM

Se observa que el EPDM es el material sobre el que recae la mayor parte del coste final en estas probetas.

Se trata de un caucho que se coloca en la capa de revestimiento superficial, con unas buenas propiedades frente a desgaste y que resiste bien las inclemencias meteorológicas que lo hacen idóneo para su utilización como superficie final.

Por esta razón, se emplea en una capa superficial, que queda limitada en todos los casos a 10 mm de espesor, ya que una mayor aportación de la cantidad de este material implica un coste por metro cuadrado de pavimento mucho mayor.

8.2.1.2 SBR

Es el otro material elastomérico empleado para la amortiguación de impactos. Se trata de un caucho reciclado de neumáticos fuera de uso, por lo que su precio es muy inferior al del EPDM.

Al ser un material mucho más barato, con muy buenas propiedades amortiguadoras, y con un acabado no muy atractivo, se emplea en la capa base que constituye la cama elástica del pavimento absorbedor de impactos conformado como caucho continuo vertido “in situ”.

Es el material más empleado, pero al ser varias veces más barato que el resto de materiales (excepto la paja), su coste tan sólo imputa al total en torno al 14%, menor en el caso de la muestra E y F debido a su composición.

8.2.1.3 Resina de poliuretano

La resina es el elemento utilizado para aglomerar los granos de caucho, tanto el SBR como los de EPDM. Por lo tanto, se trata del único componente con presencia en las dos capas del pavimento de seguridad. Este hecho, unido a que es un componente con un coste por unidad de masa muy alto en comparación con el SBR, hace que junto al EPDM represente las unidades más cuantiosas.

Sumando la resina utilizada en ambas capas, la resina supone en torno al 38% del coste total.

Hay que tener en cuenta la importancia relativa que tiene en la capa base, ya que pese a suponer tan solo el 15% del SBR en peso, según los precios utilizados, su coste es 12 veces mayor que el del SBR. Por este motivo, según los datos de costes se obtiene que atendiendo únicamente a la capa base formada por SBR al 15% en peso de resina, el coste de sólo esta capa es atribuible en un 35.56% al SBR y en un 64.44% a la resina (excepto en el caso de la muestra E que varía ligeramente al estar compuesta con una pequeña parte de paja).

Por lo cual, cuando en la fase 2 se fabrican muestras que únicamente varían el espesor de la capa base, la mayor parte del incremento del coste va asociado al uso de resina.

8.2.1.4 Imprimación

La imprimación se realiza sobre las superficies rígidas sobre las que se instala el caucho continuo, tales como soleras de hormigón y bordillos. Se aplican cuando la superficie se encuentra limpia, y se está en condiciones de empezar con el tajo de extensión de la imprimación y posteriormente la extensión de la cama elástica de SBR.

Se trata de un tipo de resina especial que permite la adherencia entre superficies como el hormigón y el caucho aglomerado.

El precio de la imprimación es el más alto de todos, habiéndose estimado una dosificación de 250 gramos por metro cuadrado, lo que hace que no repercuta demasiado en el coste total, en torno al 3% para las muestras de 40 mm de espesor.

Hay que tener en cuenta de que se trata de un coste fijo para la instalación, que es independiente del espesor instalado, sólo varía según la superficie a aplicar. Por este motivo el precio irá perdiendo importancia a medida que el coste del material aumente con el espesor.

8.2.1.5 Paja

Este elemento se ha utilizado únicamente en la muestra E. Se trata de un material con una densidad muy baja, por lo que al mezclarlo en la capa base se consigue un conjunto menos pesado. Por otro lado, es un material en torno a un 60% más barato que el SBR, por lo que al añadir paja en una mezcla de SBR y resina se está reduciendo en parte el coste de la capa.

En los datos obtenidos se observa que la muestra E es la de menor cuantía económica, por lo que es una manera muy interesante de reducir costes intentando mantiene niveles adecuados de amortiguamiento.

8.2.2 COSTES FIJOS Y VARIABLES. FASE 2.

De acuerdo a la naturaleza de las muestras, y a la metodología utilizada para estimar los costes, se presentan una serie de costes que son iguales para todas las muestras, independientemente de su tipología y espesor.

Al haber planteado la fabricación de muestras en la primera fase con la misma capa superficial, el coste de esta será el mismo en todos los casos de la fase 1. De igual modo ocurre en la segunda fase, para la que se decidió utilizar como única variable el espesor de las muestras, manteniendo una primera capa de 10 mm de espesor de EPDM y resina igual que en la fase 1, por lo que el coste de todas las capas superficie es el mismo en todas las muestras empleadas en el presente trabajo. La imprimación se considera también igual para todos los casos, ya que depende del área, y estamos estudiando todas las muestras por unidad de superficie.

De esto modo, para la fase 2, que es en la que se cambian los espesores de muestras de las muestras tipo A, B y C, se puede hablar de que existen costes fijos y costes variables. Esto significa que sea cual sea el espesor de estas muestras, para su fabricación hay que hacer frente a la composición de la capa de acabado, y a la imprimación.

Por lo tanto, el incremento de coste está únicamente asociado al cambio de espesor de la capa base de SBR y resina, que tiene sus características específicas para las muestras A, B y C.

La existencia de los costes fijos y variables se puede observar en la Observando los precios descompuestos de la Tabla 8-8 Costes desglosados y total por m2 de las muestras de la fase 2 .



A continuación, se ha ampliado la información de dicha tabla, de manera que en la tabla que sigue se puede observar el porcentaje sobre el total que representa cada material utilizado en la elaboración de las probetas de caucho continuo. También se representa la evolución que sigue en la segunda fase el coste fijo y el variable.

Muestras	Costes Fijos			Costes Variables		Coste total (€/m ²)	Coste Fijo (%)	Coste Variable (%)
	Coste capa Superficial		Coste imprimación	Coste Capa Base				
	EPDM (%)	Resina (%)	Imprimación (%)	SBR (%)	Resina (%)			
A-4	44,86	13,01	3,29	13,81	25,03	29,63	61,16	38,84
A-6	35,63	10,33	2,61	18,28	33,14	37,30	48,58	51,42
A-8	29,55	8,57	2,17	21,23	38,48	44,97	40,29	59,71
A-10	25,25	7,32	1,85	23,32	42,26	52,65	34,42	65,58
B-4	44,30	12,85	3,25	14,08	25,52	30,01	60,39	39,61
B-6	35,05	10,16	2,57	18,57	33,65	37,93	47,78	52,22
B-8	28,99	8,41	2,13	21,50	38,97	45,85	39,52	60,48
B-10	24,72	7,17	1,81	23,57	42,73	53,77	33,70	66,30
C-4	43,35	12,57	3,18	14,54	26,36	30,66	59,10	40,90
C-6	34,06	9,88	2,50	19,04	34,52	39,02	46,44	53,56
C-8	28,05	8,13	2,06	21,96	39,80	47,38	38,24	61,76
C-10	23,84	6,91	1,75	24,00	43,50	55,75	32,51	67,49

Tabla 8-10 Porcentaje respecto al coste total de los materiales descompuestos, costes fijos y variables en Fase 2 (Fuente: elaboración propia)

Observando la tabla se puede concluir que a medida que incrementa el espesor para cada tipo de muestra, el coste fijo, que implica la capa superficial y la imprimación, pasa de representar sobre el 60% del coste, a aproximadamente tan sólo el 33% en muestras de 10 cm de espesor.

Por el contrario, al aumentar el espesor, la capa base va adquiriendo cada vez más peso en el coste del pavimento de alta capacidad de absorción. El SBR, y sobre todo la resina tiene cada vez más importancia sobre el coste total por metro cuadrado de pavimento de caucho continuo.

A partir de espesores de 60 mm, la resina pasa a ser el material con mayor repercusión sobre el coste final. Si se suma la cantidad de resina empleada tanto para la capa superficial como para la base, se obtiene que, en los casos de muestras de 10 cm de espesor, la resina supone prácticamente el 50% del coste del pavimento.

El SBR gana importancia en el coste progresivamente, llegando a estar parejo en la muestra de mayor espesor al coste del EPDM empleado, dato llamativo ya que para esa muestra se emplean 10 mm de EPDM y 90 mm de SBR, lo que hace aún más evidente la diferencia de precio por tonelada de estos.

8.2.3 EVOLUCIÓN DEL COSTE EN FUNCIÓN DEL ESPESOR

El coste de la serie de muestras ensayadas se incrementa ya que estamos aumentando el espesor del pavimento, lo que requiere el uso de una mayor cantidad de materiales que provoca cambios en el precio.

Por lo tanto, otra forma de ver como evoluciona el coste, es comparándolo con los incrementos de espesor que las muestras de tipología A, B y C tienen asociadas.

Para estudiar esta relación, se ha generado una tabla que la que se pueden encontrar los datos de incrementos de espesor entre dos muestras de tamaños con 20 mm de diferencia de altura, y los incrementos que esos aumentos de espesor generan en los costes variables y totales, ya que los costes fijos, como su propio nombre indica, no se ven afectados por los cambios de espesor.

Muestras	Espesor (mm)	Coste fijo	Coste variable	Coste Total (€/m2)	Δ espesor (%)	Δ Coste Variable (%)	Δ Coste Total (%)
A-4	40	18,12	11,51	29,63	-	-	-
A-6	60		19,18	37,30	50,00	66,67	25,89
A-8	80		26,85	44,97	33,33	40,00	20,57
A-10	100		34,52	52,65	25,00	28,57	17,06
B-4	40		11,88	30,01	-	-	-
B-6	60		19,81	37,93	50,00	66,67	26,40
B-8	80		27,73	45,85	33,33	40,00	20,89
B-10	100		35,65	53,77	25,00	28,57	17,28
C-4	40		12,54	30,66	-	-	-
C-6	60		20,90	39,02	50,00	66,67	27,27
C-8	80	29,26	47,38	33,33	40,00	21,43	
C-10	100	37,62	55,75	25,00	28,57	17,64	

Tabla 8-11 Evolución costes variables y costes totales en la Fase 2 (Fuente: elaboración propia)

Con esta tabla se puede observar la importancia que tienen los costes fijos para muestras de pequeño grosor. En el paso de probetas de 40 mm de espesor a las de 60 mm, lo que supone un 50% más, tan sólo implica un incremento de aproximadamente el 25% de los costes totales.

Los incrementos de los costes variables tienen los mismos saltos de una muestra al siguiente espesor en todas las tipologías de muestras. Esto se debe al procedimiento de estimación de costes que se ha seguido, que el incremento de coste al aumentar el espesor sólo depende del coste de incrementar la capa base, y es el mismo coste de material para cualquier espesor, por lo que es un proceso de incremento de coste lineal.

Esta linealidad queda representada en la siguiente figura, relacionando en una gráfica las tres series de datos de espesor frente a coste.

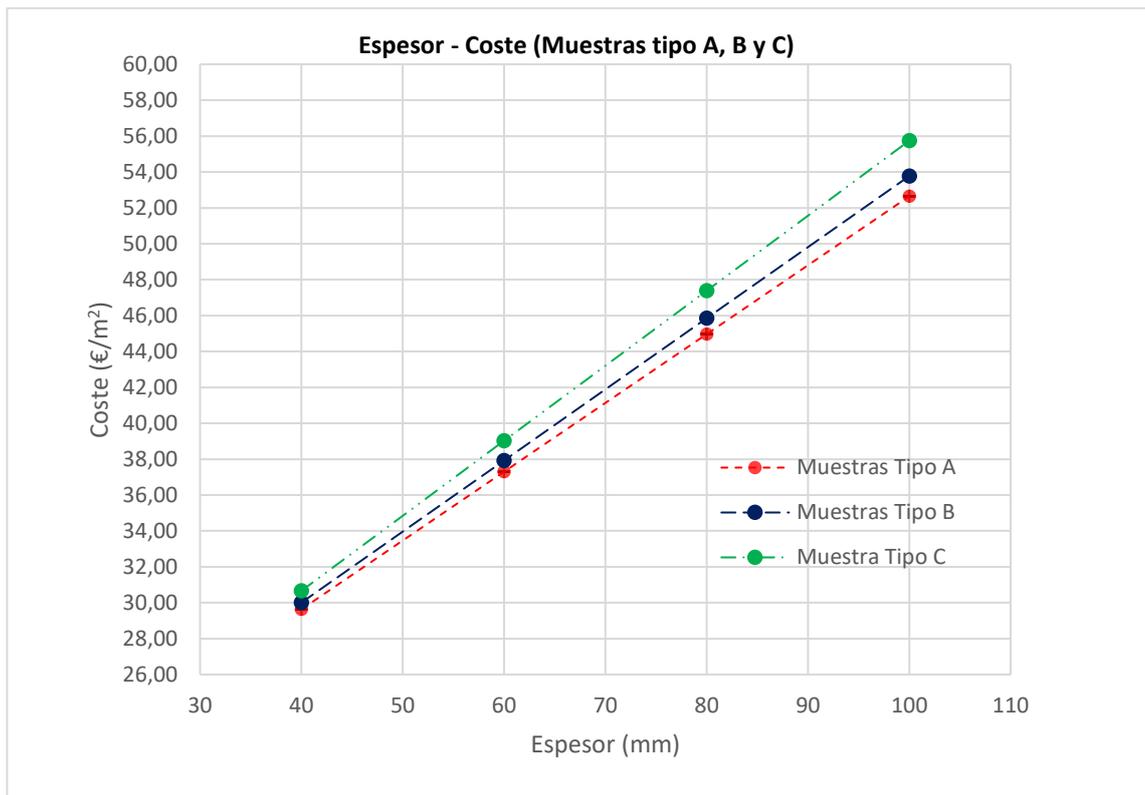


Figura 8-1 Evolución del coste en función del espesor en la Fase 2. (Fuente: elaboración propia)

Las rectas representadas no se cruzan, lo que significa que cada una sigue su propia pendiente alejándose cada vez más, es decir, coste variable es diferente para cada muestra, ocurriendo además que la muestra de mayor coste inicial (muestra C) es la que presenta mayores costes al incrementar el espesor. La muestra de coste intermedio (muestra B) es también la que tiene el segundo incremento de coste. Y por último, la muestra A es la de menor coste inicial y la que presenta menor coste al aumentar el espesor, ya que según lo estimado para el cálculo de costes esta es la muestra con menor peso en su capa base.

8.2.4 COMPARATIVA DEL COSTE FRENTE A LA ALTURA DE CAÍDA CRÍTICA

Tal como se ha comentado en el apartado 7.2.1, por lo general, y en los rangos de espesores ensayados, un aumento del espesor lleva asociado consigo un aumento de la altura de caída crítica hasta un cierto espesor en el que deje de influir este parámetro. En el campo de aplicación de estos pavimentos de caucho continuo, su instalación en áreas de juego infantil, la altura crítica de caída es la característica más importante en cuanto a seguridad en caso de que un usuario sufra un impacto contra el suelo.

La elección de un espesor de pavimento de un tamaño u otro debe atender a criterios de seguridad y cumplimiento de la normativa vigente, por lo que al elegir un espesor mayor es esperado obtener unos mayores amortiguamientos en la superficie revestida con caucho continua.

Por lo tanto, en este estudio es determinante analizar la evolución de los costes del pavimento en función de la altura de caída crítica. Para ello se acompaña la siguiente gráfica que relacione costes en función de la altura de caída crítica.

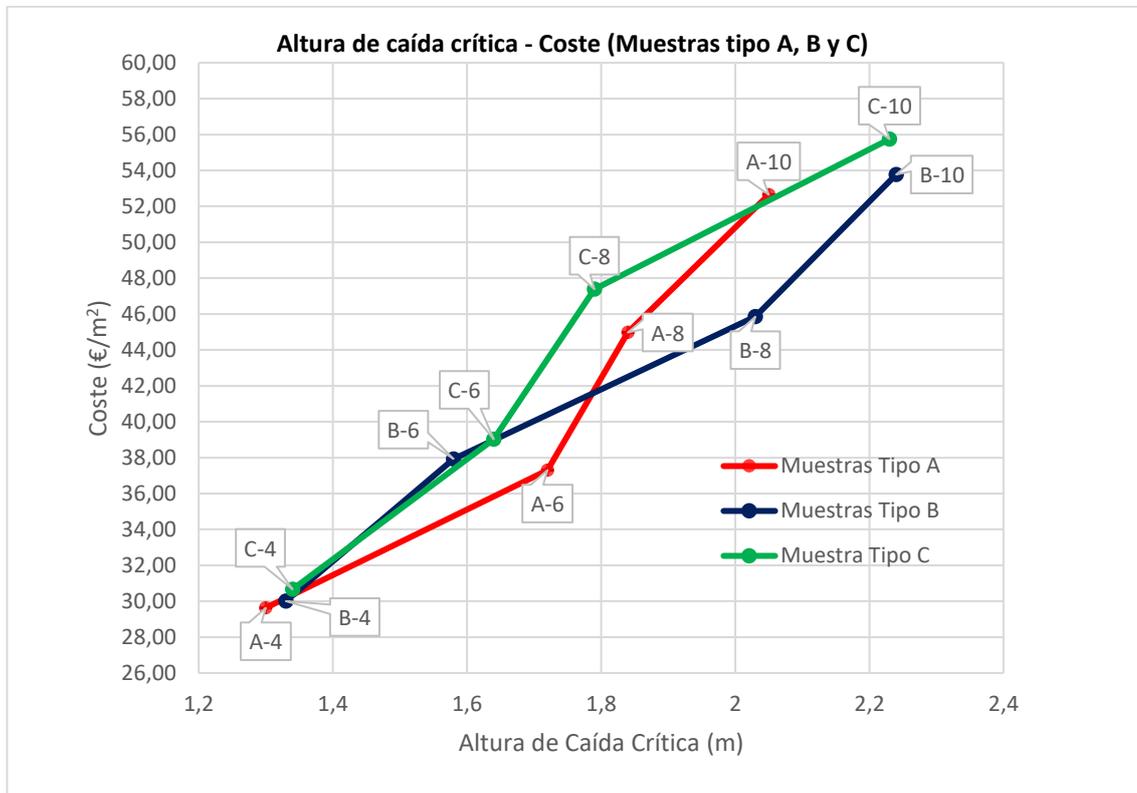


Figura 8-2 Altura de caída crítica – Coste para muestras de la fase 2 (Fuente: elaboración propia)

A valores en el eje de abscisas más altos, es decir, alturas de caída crítica mayores, el coste aumenta, ya que lo primero se consigue aumentando el espesor lo que conlleva un mayor coste.

Para los costes y alturas de caída crítica obtenidas cabe destacar lo siguiente:

- Se detectan dos rangos de mejor comportamiento amortiguación-coste, que queda determinado por el corte las curvas que unen los puntos de tipo A y los de tipo B.
- Para un amortiguamiento menor de aproximadamente 1.80 m de altura de caída crítica, las muestras del tipo A son la que presentan una mejor relación amortiguación-coste.
- Para amortiguaciones mayores de 1.80 m, las muestras del tipo B tienen un mejor comportamiento amortiguación-coste, por lo que para obtener un mejor aprovechamiento económico escogeríamos este tipo de pavimento para alturas de caída libre mayores.

- Siguiendo la línea que une las muestras del tipo C, se observa que prácticamente en ningún punto ofrecen un amortiguamiento igual o mayor que otra muestra a un menor coste. La curva se mantiene por la zona superior del gráfico dejando por debajo el resto de puntos.
- La muestra A-6 tiene un amortiguamiento muy alto en comparación a las de similares características, siendo además la de un precio más bajo.
- La muestra B-8 consigue muchos resultados similares de amortiguamiento con un coste mucho menor. Está al nivel de amortiguamiento de la muestra A-10, pero con un coste mucho más reducido.
- La muestra B-10 es la que ofrece un mayor amortiguamiento a el coste más bajo para ese rango de altura d de caída crítica.

8.2.4.1 Rendimiento a escala

Se puede deducir el rendimiento a escala considerando el coste como un factor productivo, y la altura de caída crítica como el producto.

Existen tres tipos de rendimientos a escala, los cuales se explican aplicados a la seguridad de pavimentos en parques infantiles:

- Rendimiento constante a escala:
Se tiene un rendimiento constante a escala si cuando se aumenta el factor coste del material en una proporción, la altura de caída crítica se ve aumentada en exactamente la misma proporción.
- Rendimiento creciente a escala:
Se da cuando al aumentar los costes del pavimento en una determinada proporción, la altura libre de caída aumenta en una proporción mayor.
- Rendimiento decreciente a escala:
Este es el caso que ocurre cuando la altura de caída crítica aumenta en una proporción menor que el aumento de los costes del caucho continuo.

En la siguiente tabla se puede analizar a qué tipo de economía de escala pertenecen los tres tipos de pavimentos ensayados. Para ello se ha obtenido el incremento porcentual de la altura de caída crítica y el coste respecto a cada muestra de 40 mm de espesor. En la última columna se indica para cada tramo si el rendimiento de escala es constante, creciente o decreciente, en función de si el incremento de coste es igual, mayor o menor, respectivamente, que el incremento de altura de caída crítica.

Muestra tipo A					
Muestra	Altura de Caída Crítica (m)	Coste (€/m ²)	Δ Altura de caída Crítica (%)	Δ coste (%)	Rendimiento a escala
A-4	1,30	29,63	-	-	-
A-6	1,72	37,30	32,31	25,89	Creciente
A-8	1,84	44,97	41,54	51,79	Decreciente
A-10	2,05	52,65	57,69	77,68	Decreciente

Muestra tipo B					
Muestra	Altura de Caída Crítica (m)	Coste (€/m ²)	Δ Altura de caída Crítica (%)	Δ coste (%)	Rendimiento a escala
B-4	1,33	30,01	-	-	-
B-6	1,58	37,93	21,54	28,01	Decreciente
B-8	2,03	45,85	56,15	54,75	Creciente
B-10	2,24	53,77	72,31	81,48	Decreciente

Muestra tipo C					
Muestra	Altura de Caída Crítica (m)	Coste (€/m ²)	Δ Altura de caída Crítica (%)	Δ coste (%)	Rendimiento a escala
C-4	1,34	30,66	-	-	-
C-6	1,64	39,02	26,15	31,70	Decreciente
C-8	1,79	47,38	37,69	59,92	Decreciente
C-10	2,23	55,75	71,54	88,14	Decreciente

Tabla 8-12 Variaciones de la altura de caída crítica y el coste de las muestras de la Fase 2 (Fuente: elaboración propia)

Como se puede observar, el comportamiento en cuanto a economía de escala no es completamente homogéneo, ya que se presentan intervalos en las muestras A y B que al aumentar un porcentaje el coste del material, el amortiguamiento lo hace en mayor proporción.

Si se atiende al resultado entre la muestra inicial de menor espesor y la final de mayor espesor, si se puede concluir para las tres tipologías de muestras que nos encontramos ante una economía de escala decreciente, es decir, un incremento de los costes de producción de las muestras, en definitiva, mayores espesores y materiales empleados, no ofrece las mismas proporciones de aumento del amortiguamiento del material.

8.2.4.2 Eficiencia y rendimiento de las muestras ensayados.

También se puede realizar un análisis atendiendo a criterios de eficiencia de amortiguamiento y coste en función de la cantidad de material empleada. Si consideramos un parámetro que mida la relación entre el amortiguamiento y el espesor de una muestra, llamado $R = \frac{\text{Altura de Caída Crítica (m)}}{\text{Espesor (mm)}}$, entonces tendremos un ratio que es un indicador de la eficiencia amortiguadora al cambiar el espesor de un pavimento. El parámetro R representa la altura de caída crítica que tendría un

milímetro de espesor de pavimento, para cada tipo de muestra, es decir, el aprovechamiento del material en cuanto a amortiguamiento.

En la siguiente tabla se muestra el cálculo del parámetro R, así como el incremento de este y del coste para cada cambio de espesor en los tres tipos de muestras ensayadas.

Muestras Tipo A						
Muestra	Espesor (mm)	Altura de Caída Crítica (m)	R (m/mm)	Coste (€/m ²)	Δ R (%)	Δ coste (%)
A-4	40	1,30	0,03250	29,63	-	-
A-6	60	1,72	0,02867	37,30	-11,79	25,89
A-8	80	1,84	0,02300	44,97	-19,77	20,57
A-10	100	2,05	0,02050	52,65	-10,87	17,06

Muestra tipo B						
Muestra	Espesor	Altura de Caída Crítica (m)	R (m/mm)	Coste (€/m ²)	Δ R (%)	Δ coste (%)
B-4	40	1,33	0,03325	30,01	-	-
B-6	60	1,58	0,02633	37,93	-20,80	26,40
B-8	80	2,03	0,02538	45,85	-3,64	20,89
B-10	100	2,24	0,02240	53,77	-11,72	17,28

Muestra tipo C						
Muestra	Espesor	Altura de Caída Crítica (m)	R (m/mm)	Coste (€/m ²)	Δ R (%)	Δ coste (%)
C-4	40	1,34	0,03350	30,66	-	-
C-6	60	1,64	0,02733	39,02	-18,41	27,27
C-8	80	1,79	0,02238	47,38	-18,14	21,43
C-10	100	2,23	0,02230	55,75	-0,34	17,64

Tabla 8-13 Parámetro R y coste de las muestras en fase 2. (Fuente: elaboración propia)

Se presentan los datos obtenidos en la tabla anterior en la siguiente gráfica que relaciona el mencionado parámetro R con el coste de cada muestra.

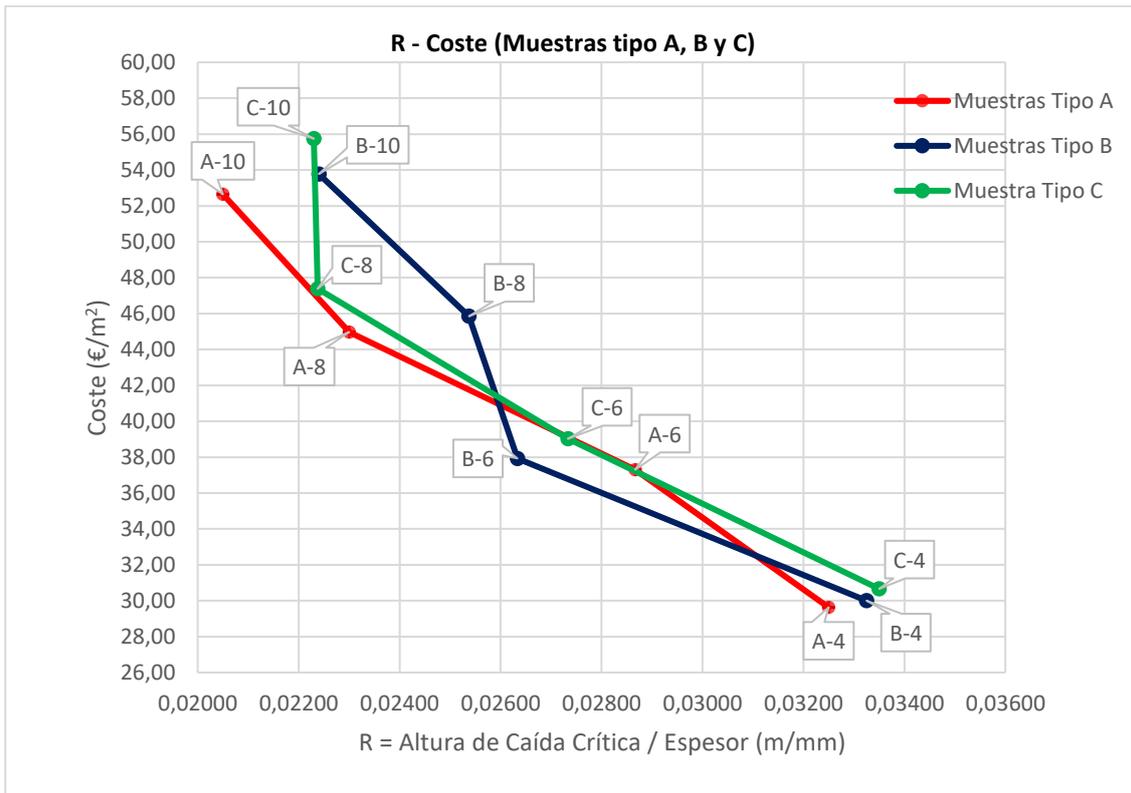


Figura 8-3 Eficiencia y coste de las muestras en la fase 2. (Fuente: elaboración propia)

Los puntos con mejor eficiencia en cuanto a la utilización del material son los que se encuentran más a la derecha del eje de abscisas. Las muestras más eficientes en cuanto al uso de cantidad de material son las de menor espesor, siendo las menos eficientes las de mayor espesor, y guardando la misma relación todas las muestras, aunque hay algo de dispersión en las muestras de 60 y 80 mm.

Este fenómeno responde a que estamos ante una economía de escala decreciente, por lo que para aumentar la altura de caída crítica un porcentaje determinado, es necesario incrementar el espesor en mayor medida, por lo que cuanto mayor sea la altura de caída menor será la eficiencia de ese pavimento.

Que exista este rendimiento decreciente a escala responde al comportamiento frente a amortiguamiento analizado en el apartado 7.

8.3 CONCLUSIONES ECONÓMICAS

En el presente apartado se recogen algunas de las principales ideas y conclusiones obtenidas a lo largo del desarrollo del análisis económico.

- Del análisis del coste estimado descompuesto por materiales, se entiende el por qué este tipo de pavimentos se instalan de este modo bicapa, con una capa como revestimiento del mínimo espesor posible, y otra que actúa como base elástica para el amortiguamiento de los impactos y que es notablemente más económica

La capa superficial cuenta con 10 mm de espesor, lo que supone el 25 % del espesor total en las muestras de la fase 1. Sin embargo, el coste supone para todos los casos en torno al 60% del total. Está formada por una mezcla de caucho sintético EPDM y resinas con mayor dotación que en la capa base, siendo este caucho de mucho mayor coste que el reciclado. De acuerdo a los precios de la Tabla 8-1 Precios materiales empleados, el EPDM es tiene un coste 7.5 veces mayor que el SBR utilizado en la capa inferior, por lo que es una de las razones principales para que este tipo de pavimentos de seguridad se construyan de manera bicapa, tratando de minimizar el uso del material de acabado y utilizando el SBR como parte de la capa que tiene la mayor aportación en cuanto a amortiguamiento a un coste mucho menor.

Por lo tanto, es importante tratar de minimizar el uso de EPDM para conseguir así precios de pavimentos más económicos.

- El coste de incrementar el espesor de la capa de SBR negro de un pavimento de caucho continuo recae principalmente sobre la resina, pese a que tan sólo se utiliza un porcentaje en peso del SBR, en una proporción adecuada de manera que permita ligar bien la mezcla. Esto es debido a que el coste de la resina es doce veces mayor que el del SBR.
- Los costes de material son muy elevados salvo en el caso del SBR. Esto implica que el caucho en general, y el caucho continuo en particular, requiera de una minuciosa optimización de los recursos a emplear, ya que una pequeña disminución de dosificaciones de resinas o uso de EPDM puede suponer al final un coste de material mucho menor, siempre que cumpla con su cometido principal, la protección frente a caídas de niños en áreas de juego.
- De las muestras ensayadas, la muestra tipología C es presenta la peor relación coste-amortiguamiento, por lo que según estos dos criterios es la peor alternativa.
- La muestra del tipo A presenta el mejor comportamiento técnico y económico hasta una altura de caída crítica aproximadamente de 1.80 m, mientras que, a partir de alturas de caída crítica superiores a la indicada, la alternativa B sería la que guarda mejor relación coste-amortiguación. Por lo tanto, la elección del pavimento se realizara atendiendo a la altura de caída libre necesaria, escogiendo en el rango de menores alturas la alternativa de pavimento tipo A, y la del tipo B para el otro caso.

- El caucho continuo es un pavimento de seguridad con un rendimiento decreciente a escala. Esto significa que para aumentar la amortiguación de un tipo determinado pavimento de seguridad, se requiere incrementar en mayor proporción los espesores y como consecuencia el coste del material.
- Como consecuencia de la economía de escala decreciente, las muestras más eficientes en cuanto altura de caída crítica respecto al material empleado (espesor) son las muestras ensayadas con menor espesor.

9 COCLUSIONES Y LÍNEAS DE FUTURO

En el presente apartado se recogen aquellas conclusiones obtenidas a lo largo del desarrollo del trabajo, tratando de satisfacer los objetivos planteados al inicio del mismo, y obteniendo nuevos interrogantes e inquietudes que se plasman como posibles líneas de investigación de futuro.

9.1 CONCLUSIONES

En el análisis técnico y económico se han recogido las principales conclusiones extraídas del planteamiento y metodología seguida para la fabricación de muestras de caucho continuo y posterior ensayo.

Las conclusiones se toman en base al campo de aplicación de los pavimentos empleados, la seguridad en los parques infantiles.

Después de la realización de los ensayos de rigidez y altura de caída crítica de las 17 muestras fabricadas, que caracterizan el material en cuanto a propiedades de rigidez y amortiguamiento, se ha obtenido una gran variabilidad de resultados, que en algunos casos tan sólo dejan plantear posibles hipótesis explicativas.

- En primer lugar, las muestras con mejores propiedades amortiguadoras son las de mayor espesor, en concreto la probeta B-10 y la C-10, con alturas significativamente superiores a la A-10 para el mismo espesor de 10 cm. Esto significa que cuando se requiera cubrir superficies con una altura de caída libre elevada, atendiendo a criterios técnicos no se escogerán las muestras de tipo A
- En la fase 1 se observa que, para pavimentos con el mismo espesor (40 mm), en general se obtienen resultados muy similares, registrando las mayores alturas de caída crítica las muestras A, B y C, correspondientes a los pavimentos formados por una sola granulometría de SBR. Esto induce a pensar que los mejores pavimentos son aquellos pavimentos formados por un único tamaño de grano, ya que, al existir un mayor número de huecos, el aire que quede dentro colaborará en la absorción de impactos.
- Del análisis de las muestras de un mismo tipo, en las que sólo varía el espesor, se observa que la altura de caída crítica aumenta a la vez que lo hace el espesor. En el caso de la rigidez ocurre el efecto contrario, a mayor espesor menor rigidez. La rigidez se llega a estabilizar en el rango de espesores ensayados. Para los cambios de espesor de 80 a 100 mm en las muestras tipo A y B no se produce un cambio de rigidez, por lo que este ensayo pierde validez para caracterizar el amortiguamiento de este tipo de pavimentos a partir de un espesor relativamente bajo.

En cambio, este efecto no se ve reflejado en los resultados de altura de caída crítica, aunque si se aprecia que, por lo general, el aumento de la amortiguación es cada vez menor con un mismo incremento de espesor, por lo que para cada muestra existirá un espesor a partir del cual un incremento de este no implique un aumento del amortiguamiento.

- En relación con lo anterior, se puede concluir que si existe una relación entre ambos ensayos: a mayor altura de caída crítica, menor rigidez. Esta relación, según lo explicado en el párrafo anterior, está limitada a un rango de espesores en los que la rigidez no ha llegado a estabilizarse. Por este motivo, resulta muy complicado obtener una correlación, que mediante una ley se pudiera obtener un parámetro en función del otro.

Por este motivo no se puede cumplir, para el caso de las muestras ensayadas y resultados obtenidos, uno de los objetivos del trabajo, que es obtener una correlación entre ambos ensayos

- De lo anterior también se deduce que el ensayo de determinación de la altura crítica de caída es más sensible que en ensayo de rigidez, en cuanto a la medición de la amortiguación de un pavimento de estas características.
- Al analizar los costes de cada muestra descomponiendo según los componentes utilizados, se entiende el motivo de fabricar el caucho continuo de forma bicapa, teniendo la capa superficial de EPDM el menor espesor posible. Esto se debe a que el coste de la capa superficial es muy elevado, representado más de un 60% del coste total para las muestras de 40 mm. Por ello se emplea una capa base elástica de SBR reciclado, con un coste mucho menor en comparación al revestimiento superficial
- La paja empleada en la muestra E ofrece los peores resultados de forma significativa. El pavimento E tiene la misma constitución que la muestra C, a excepción de que se le ha añadido paja. Este cambio implica una mayor ligereza y una mezcla con un material de coste inferior al SBR, por lo que finalmente se traduce un menos coste de material (la muestra C tiene un precio un 8% más elevado que la E).
Este cambio también implica una modificación de las propiedades amortiguadoras, ya que se está sustituyendo un material por otro con peores características en este sentido. Según los resultados, la muestra C amortigua un 15% más que la E, por lo que este cambio, económicamente hablando es de una economía de escala creciente. Es decir, al aumentar tus recursos para adquirir pavimentos de la muestra C en vez de la E, se obtendría un incremento de la altura de caída crítica en mayor proporción.
- El incremento del espesor de la capa de SBR recae principalmente sobre la resina, por lo que es imprescindible obtener una dosificación adecuada que

permita mantener una mezcla homogénea, cohesionada y con buenas propiedades absorbedoras de impacto, sin utilizar excesos de ligante que incrementen el coste innecesariamente.

- Los pavimentos de seguridad ensayados presentan una economía de escala decreciente, ya que al relacionar el coste con el amortiguamiento se observa que un incremento de coste en una determinada proporción, aumenta la altura de caída libre en una proporción menor.
Por lo tanto, las muestras que ofrecen una mejor eficiencia en cuanto a relación coste-amortiguación son las de menor espesor.
- En relación a los costes y amortiguación, se concluye que la muestra C es la que peor relación coste-amortiguación ofrece, por lo que, a la hora de seleccionar un tipo de muestra, atendiendo a criterios técnicos y económicos, en ningún caso se escogería las muestras del tipo C fabricadas en la segunda fase.
Por otro lado, hasta una altura de caída crítica aproximadamente de 1.80 m, por criterios económicos y de amortiguamiento, la opción elegida sería la de tipología A. A partir de alturas de caída crítica superiores a la indicada, la alternativa B sería la escogida.
- Con la realización de varios ensayos en una muestra de un mismo tipo, es interesante que posiblemente se obtiene una curva que relacione la altura de caída crítica con el espesor, que se ajusta fielmente a la realidad. De este modo, en el momento de diseñar un parque infantil, si un fabricante posee curvas de este tipo para diferentes alternativas, el proyectista podrá escoger el espesor adecuado para la altura de caída libre de cada elemento de juego previsto.

9.2 LÍNEAS DE FUTURO

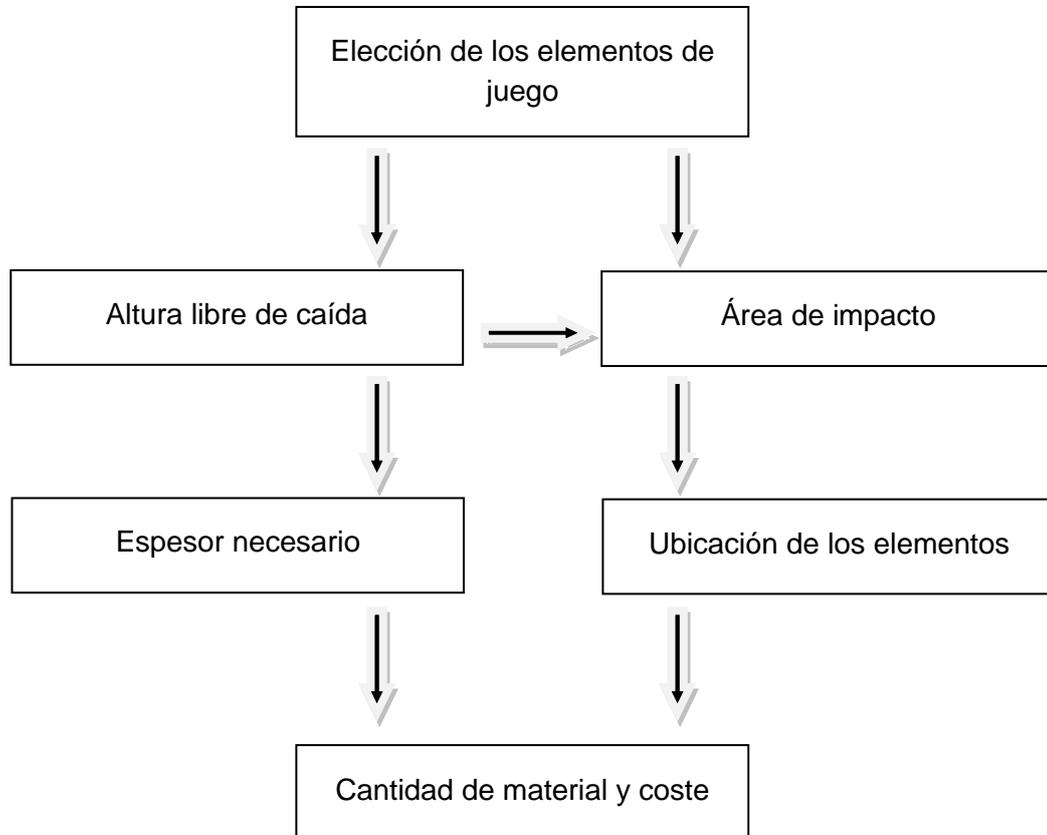
Se han detectado las siguientes posibles líneas de trabajo.

- El planteamiento del presente trabajo queda limitado por su condición académica. Podría ampliarse el desarrollo del planteamiento inicial de este trabajo de investigación, realizando ensayos para una mayor variedad de espesores, y de tipología de muestras, y siguiendo estrictamente las directrices marcadas para cada ensayo.
 - Los ensayos de altura de caída crítica con una mayor cantidad de espesores para un mismo tipo de material, permitirían caracterizar el perfectamente el comportamiento frente a absorción de impactos, en las mismas condiciones, lo que permitiría a los fabricantes obtener una curva que relacione el amortiguamiento con el espesor, pudiendo calcular el espesor necesario para cada caso.
 - En cuanto a los ensayos de rigidez, se podría intentar plantear la correlación entre ensayos para espesores no muy grandes, planteando ensayos variando el espesor unos pocos milímetros entre cada muestra.
- La obtención de curvas que relacionen espesor con amortiguamiento de una forma realista, podría suponer poder plantear un “método integral para el diseño de áreas infantiles” a la hora de diseñar un parque infantil.

A la hora de proyectar un espacio de este tipo, se seguiría un proceso similar al siguiente:

 - Una vez conocida la superficie disponible y las necesidades de la zona, se eligen los elementos de juego.
 - Se ubican los diferentes juegos en planta, de manera que se distribuyan bien los espacios y se cumplan los requisitos en cuanto a distancias de seguridad. Para ello es muy importante conocer las dimensiones del elemento de juego, ya que permitirá obtener tanto la altura libre de caída, como .la superficie que ocupa y el área de impacto requerido, que también depende de la altura libre de caída.
 - Con la altura libre de caída, podríamos utilizar las curvas disponibles por los fabricantes para diferentes alternativas, de manera que en función de la altura de cada juego estimásemos el espesor necesario, tratando de elegir la alternativa más económica.
 - También se puede obtener la superficie de pavimento necesaria para cada elemento de juego, pudiendo calcular el coste requerido.
 - Conocidos los espesores necesarios y las dimensiones de cada área de caída, se puede tratar de optimizar la utilización del material construyendo la solera con sobreexcavaciones que permitan aumentar el espesor en una zona sin que se pueda apreciar en el exterior.

A continuación, se esquematiza el proceso a seguir para realizar un diseño integral de un área infantil.



- Se podría seguir el estudio iniciado variando otros parámetros además del espesor. Estas variables pueden afectar a la composición del material, como el contenido de resina en cada capa, la variación de granulometrías y su mezcla en distintas proporciones, o la adición de otros componentes. Además, para el presente trabajo no se han tenido en cuenta variables que pueden simular las condiciones de uso a la intemperie, como puede ser la temperatura y la humedad.
- Este tipo de análisis se puede ampliar a otra tipología de materiales, como pueden ser las losetas de caucho, u otras capas amortiguadoras. En el presente trabajo se ha utilizado una muestra tipo loseta de caucho, que no ha permitido comparar adecuadamente los resultados. La muestra F presentaba un aligeramiento de material en la parte inferior. Podría ser interesante fabricar probetas de diferente espesor con este aligeramiento para observar hasta qué punto influye positivamente en el amortiguamiento. En este mismo sentido, podrían buscarse nuevas geometrías óptimas, tanto para muestras de 40 mm de espesor, como para otros.



- El análisis económico se ha realizado comparando únicamente alternativas de un mismo tipo de material, considerando costes de instalación y mantenimiento iguales.
En este sentido, podría plantearse el estudio de diferentes alternativas de pavimentos de diverso tipo, como el caucho continuo, losetas de caucho y arena, para posteriormente realizar un análisis coste-beneficio, teniendo en cuenta otros factores, como beneficios sociales (mayor amortiguamiento).

10 REFERENCIAS

- ADIF. Pliego de prescripciones técnicas particulares para la contratación del suministro y transporte de manta antivibratoria de atenuación alta, Abril 2011.
- ARIES, Phillipe. L'Enfant et la vie familiale sous l'Ancien Régime. Seuil, 1960.
- B. C.V., The Chemistry of Rubber Vulcanization and Acceleration, THE JOURNAL OF INDUSTRIAL AND ENGINEERING CHEMISTRY, vol. 14, p. 1, 1922.
- BILLMEYER,F., Ciencia de los polímeros, Reimpresión ed. España: Reverté S.A., 1975, 2004.
- BURAK, E. y JAMES E , M., Structures and Properties of Rubberlike Networks. United States: Oxford University Press, Inc., 1997.
- CAL CRUZ,B. R., BELKIS F,E A y ÁLVAREZ GARCÍA, R. A. B.Evaluación de elastómeros vulcanizados. Afinidad. 131-136, 2012.
- CARRASCAL, I.; CASADO, J. A.; DIEGO. S.; POLANCO, J. A. Comportamiento mecánico frente a esfuerzos dinámicos de manta elastomérica para la atenuación de vibraciones en ferrocarriles, 2012.
- Declaración de los Derechos del Niño 20 de Noviembre de 1959
- EICHINGER, B. E., Rubber elasticity: Solution of the James-Guth model, Physical Review E, vol. 91, May 2015.
- GÁLVEZ SOSA, M. I. y RODRIGUEZ LEDEZMA, N. C. Jugando Juntos: un tercer lugar para niños de 3 a 6 años y su familia. Tesis Licenciatura. Diseño de Información. Departamento de Diseño de Gráfico, Escuela de Artes y Humanidades, Universidad de las Américas Puebla, 2005.
- GOLDBART, P. M.,CASTILLO, H. E. y ZIPPELIUS, A., Randomly crosslinked macromolecular systems: Vulcanization transition to and properties of the amorphous solid state, 1996.
- HIMMELSBACH, J.A. y SHORTEN M.R. Playground surfacing and playground injuries, 2003. Pp 71-88 in Sports Surfaces (Eds. B.M. Nigg, G.K. Cole, D.J. Stefanyshyn) Calgary, University of Calgary
- ONOKPISE,O. U., "Natural rubber, Hevea brasiliensis (Willd. Ex A. Juss.) Mull. Arg., germplasm collection in the Amazon basin, Brazil: A retrospective", Economic Botany, vol. 58, pp. 544-555, Win, 2004.

- TREOLAR, L. R. G., The Physics of Rubber Elasticity, 3ª ed., 2005.
- TREOLAR, L., The Elasticity and Related Properties of Rubber, Reports on Progress in Physics, vol. 36, pp. 755-826, 1973.
- UNE-EN 1176-1:2009 Equipamiento de las áreas de juego y superficies. Parte 1: Requisitos generales de seguridad y métodos de ensayo.
- UNE-EN 1177:2009 Revestimientos de las superficies de las áreas de juego absorbentes de impactos. Determinación de la altura de caída crítica.

ANEXO I – COLABORADORES

Este Trabajo Fin de Máster se ha llevado a cabo gracias a la colaboración de con tres entidades, cada cual ha aportado su parte, sin la cual hubiera sido imposible realizar el trabajo.

SANPE INGENIERÍA, S.L.

Organismo de inspección de parques infantiles acreditado por ENAC. Ha participado cediendo el equipo de ensayo para determinación de la altura de caída crítica, calibrado y acreditado por ENAC, y sus instalaciones para llevar a cabo estos ensayos. Además de su experiencia en el campo relativo a la seguridad en parques infantiles.



Además. el responsable del órgano de inspección David Santos Gómez ha actuado como director externo a la Universidad



LABORATORIO DE LA DIVISIÓN DE CIENCIA E INGENIERÍA DE LOS MATERIALES

Laboratorio de materiales de la Universidad de Cantabria. Ha colaborado en este proyecto con la cesión y realización de los ensayos de rigidez estática y dinámica. Además, sus investigadores han aportado su sabiduría y experiencia en el campo de los materiales, dando muchas de las claves para interpretar los resultados obtenidos.

VULGALIA, S.L.

Empresa española especializada desde hace más de 45 años en el sector del caucho. Han colaborado



cediendo muestras fabricada en sus instalaciones específicamente para este trabajo. Su conocimiento sobre este material ha sido clave para el desarrollo del trabajo.

11 ANEXO II – GALERÍA FOTOGRÁFICA

En este apartado se adjuntan a modo de ejemplo, algunas de las fotografías tomadas durante la realización de los ensayos, para documentar estos gráficamente.



Ilustración 11-1 Conjunto de muestras de la Fase 1 (Fuente: elaboración propia)



Ilustración 11-2 Detalle disposición de ensayo de rigidez en Fase 1 (Fuente: LADICIM)

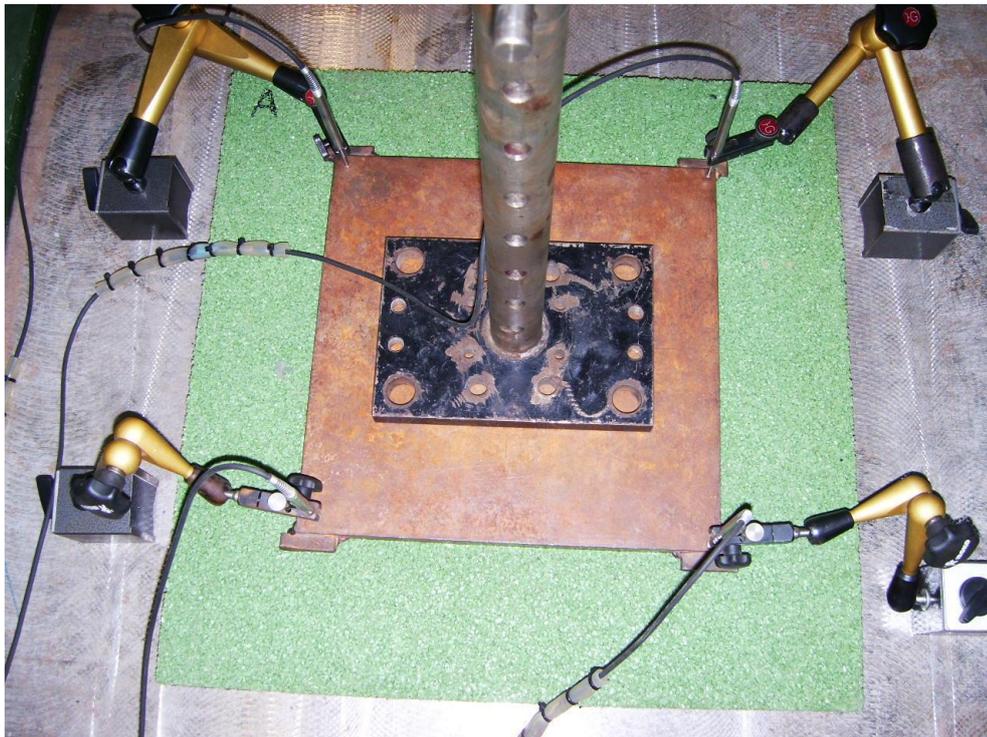


Ilustración 11-3 Detalle disposición de ensayo de rigidez en Fase 1. Muestra A (Fuente: LADICIM)



Ilustración 11-4 Pesaje de muestras en Fase 1. Muestra A (Fuente: LADICIM)



Ilustración 11-5 Disposición de ensayo de altura de caída crítica en Fase 1. Muestra A (Fuente: elaboración propia)



Ilustración 11-6 Conjunto de muestras Fase 2 en el laboratorio de LADICIM (Fuente: elaboración propia)



Ilustración 11-7 Disposición de ensayo de rigidez estática en Fase 2. Muestra B-6. (Fuente: LADICIM)



Ilustración 11-8 Colocación de las probetas sobre marco en Fase 2 (Fuente: elaboración propia)

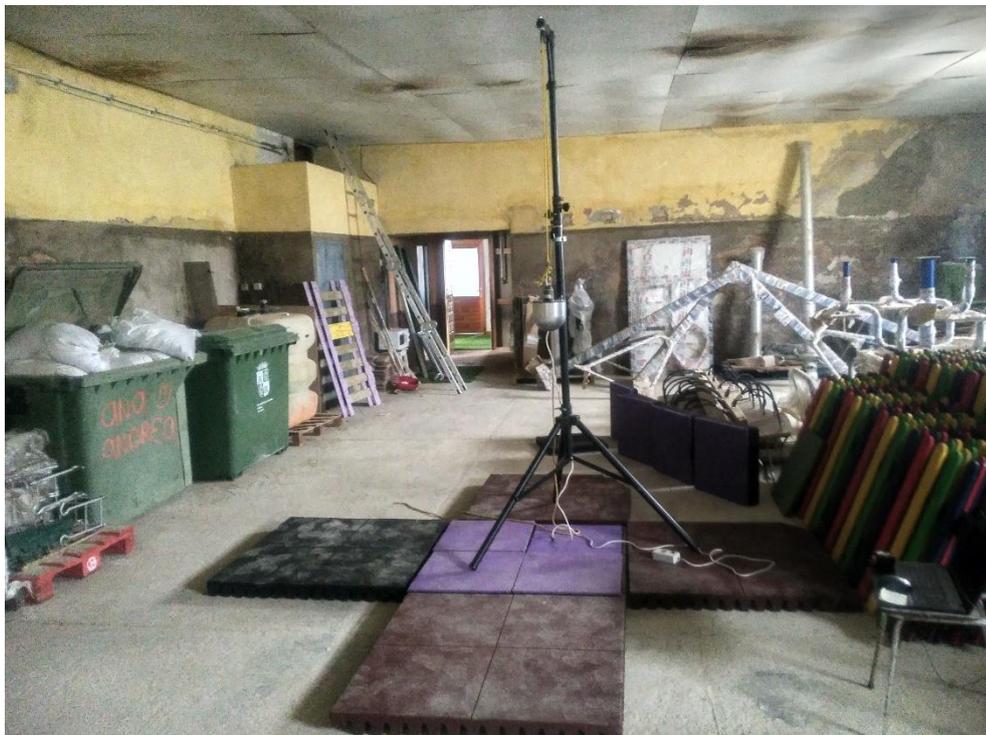


Ilustración 11-9 Disposición de equipo de ensayo de determinación de altura de caída y muestras preparadas para ensayo. Fase 2 (Fuente: elaboración propia)



Ilustración 11-10 Disposición de ensayo de determinación de altura de caída crítica en Fase 2. Muestra B-8 (Fuente: elaboración propia)



Ilustración 11-11 Conjunto de muestras empleadas almacenadas una vez finalizados todos los ensayos (Fuente: elaboración propia)

12 ÍNDICE DE FIGURAS, TABLAS E ILUSTRACIONES.

12.1 ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 4-1 Dimensión del área de impacto (Fuente: Norma EN 1176-1).....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 4-2 Ejemplo de espacio de caída y área de impacto de una plataforma (Fuente: Norma EN 1176-1).....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 4-3 Formulación química del monómero y del polímero del caucho natural</i>	<i>37</i>
<i>Figura 4-4 Enlace de polímeros.</i>	<i>37</i>
<i>Figura 4-5 Comparación curva tensión-deformación de caucho vulcanizado y sin vulcanizar [Fuente: F. Billmeyer, Ciencia de los polímeros)</i>	<i>39</i>
<i>Figura 4-6 Reacción química del azufre con polisopreno durante el proceso de vulcanización</i>	<i>42</i>
<i>Figura 4-7 Estructura química del copolímero de caucho sintético estireno-butadieno</i>	<i>44</i>
<i>Figura 4-8 Ejemplo típico de trazado de la aceleración en función del tiempo (Fuente: Norma EN 1177).....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 4-9 Sección transversal esquemática del uso de mantas elastoméricas.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 4-10 Sección transversal esquemática de la vía en placa.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 5-1 Dispositivo de ensayo para determinar la altura de caída crítica (Fuente: Norma EN:1177).....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 5-2 Curva típica de los índices HIC en función de la altura de caída (Fuente: Norma EN 1177).....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 5-3 Esquema de ensayo de rigidez estática.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 5-4 Esquema de ensayo de rigidez dinámica.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 5-5 Representación gráfica del cálculo del módulo de rigidez dinámica C_{din}</i>	<i>69</i>
<i>Figura 6-1 Representación gráfica del cálculo de la rigidez estática</i>	<i>90</i>
<i>Figura 6-2 Representación gráfica del cálculo del módulo de rigidez dinámica C_{din}</i>	<i>91</i>
<i>Figura 6-3 Altura de caída - HIC en puntos 1, 2 y 3. Muestra A (Fuente: Sanpe Ingeniería)</i>	<i>92</i>
<i>Figura 6-4. Curva carga – desplazamiento medio Cest Muestra A (Fuente: LADICIM)</i>	<i>93</i>
<i>Figura 6-5 Curva carga – desplazamiento medio C_{din} Muestra A (Fuente: LADICIM)</i>	<i>93</i>

Figura 6-6 Altura de caída - HIC en puntos 1, 2 y 3. Muestra B (Fuente: Sanpe Ingeniería) 94

Figura 6-7 Curva carga – desplazamiento medio Cest Muestra B (Fuente: LADICIM) 95

Figura 6-8 Curva carga – desplazamiento medio Cdin Muestra B (Fuente: LADICIM) 95

Figura 6-9 Altura de caída - HIC en puntos 1, 2 y 3. Muestra C (Fuente: Sanpe Ingeniería) 96

Figura 6-10 Curva carga – desplazamiento medio Cest Muestra C (Fuente: LADICIM) 97

Figura 6-11 Curva carga – desplazamiento medio Cdin Muestra C (Fuente: LADICIM) 97

Figura 6-12 Altura de caída - HIC en puntos 1, 2 y 3. Muestra D (Fuente: Sanpe Ingeniería) 98

Figura 6-13 Curva carga – desplazamiento medio Cest Muestra D (Fuente: LADICIM) 99

Figura 6-14 Curva carga – desplazamiento medio Cdin Muestra D (Fuente: LADICIM) 99

Figura 6-15 Altura de caída - HIC en puntos 1, 2 y 3. Muestra E (Fuente: Sanpe Ingeniería) 100

Figura 6-16 Curva carga – desplazamiento medio Cest Muestra E (Fuente: LADICIM) 101

Figura 6-17 Curva carga – desplazamiento medio Cdin Muestra E (Fuente: LADICIM) 101

Figura 6-18 Altura de caída - HIC en puntos 1, 2 y 3. Muestra F (Fuente: Sanpe Ingeniería) 102

Figura 6-19 Curva carga – desplazamiento medio Cest Muestra F (Fuente: LADICIM) 103

Figura 6-20 Curva carga – desplazamiento medio Cdin Muestra F (Fuente: LADICIM) 103

Figura 6-21 Altura de caída - HIC en puntos 1, 2 y 3. Muestra G (Fuente: Sanpe Ingeniería) 104

Figura 6-22 Curva carga – desplazamiento medio Cest Muestra C (Fuente: LADICIM) 105

Figura 6-23 Curva carga – desplazamiento medio Cdin Muestra G (Fuente: LADICIM) 105



Figura 6-24 Altura de caída - HIC en puntos 1, 2 y 3. Muestra H (Fuente: Sanpe Ingeniería) 106

Figura 6-25 Curva carga – desplazamiento medio Cest Muestra H (Fuente: LADICIM) 107

Figura 6-26 Curva carga – desplazamiento medio Cdin Muestra H (Fuente: LADICIM) 107

Figura 6-27 Altura de caída - HIC en puntos 1, 2 y 3. Muestra A-6 (Fuente: Sanpe Ingeniería) 108

Figura 6-28 Curva carga – desplazamiento medio Cest Muestra A-6 (Fuente: LADICIM)..... 109

Figura 6-29 Altura de caída - HIC en puntos 1, 2 y 3. Muestra A-8 (Fuente: Sanpe Ingeniería) 110

Figura 6-30 Curva carga – desplazamiento medio Cest Muestra A -8 (Fuente: LADICIM)..... 111

Figura 6-31 Altura de caída - HIC en puntos 1, 2 y 3. Muestra A-8 (Fuente: Sanpe Ingeniería) 112

Figura 6-32 Curva carga – desplazamiento medio Cest Muestra A-10 (Fuente: LADICIM)..... 113

Figura 6-33 Altura de caída - HIC en puntos 1, 2 y 3. Muestra B-6 (Fuente: Sanpe Ingeniería) 114

Figura 6-34 Figura 6-35. Curva carga – desplazamiento medio Cest Muestra B-6 (Fuente: LADICIM)..... 115

Figura 6-36 Altura de caída - HIC en puntos 1, 2 y 3. Muestra B-8 (Fuente: Sanpe Ingeniería) 116

Figura 6-37 Figura 6-38. Curva carga – desplazamiento medio Cest Muestra B-8 (Fuente: LADICIM)..... 117

Figura 6-39 Altura de caída - HIC en puntos 1, 2 y 3. Muestra B-10 (Fuente: Sanpe Ingeniería) 118

Figura 6-40 Figura 6-41. Curva carga – desplazamiento medio Cest Muestra B-10 (Fuente: LADICIM)..... 119

Figura 6-42 Altura de caída - HIC en puntos 1, 2 y 3. Muestra C-6 (Fuente: Sanpe Ingeniería) 120

Figura 6-43 Figura 6-44. Curva carga – desplazamiento medio Cest Muestra C-6 (Fuente: LADICIM)..... 121

Figura 6-45 Altura de caída - HIC en puntos 1, 2 y 3. Muestra C-8 (Fuente: Sanpe Ingeniería) 122



Figura 6-46 Figura 6-47. Curva carga – desplazamiento medio Cest Muestra C-8 (Fuente: LADICIM)..... 123

Figura 6-48 Altura de caída - HIC en puntos 1, 2 y 3. Muestra C-10 (Fuente: Sanpe Ingeniería) 124

Figura 6-49 Figura 6-50. Curva carga – desplazamiento medio Cest Muestra C-10 (Fuente: LADICIM)..... 125

Figura 7-1 Altura de Caída Crítica y desviación típica en Fase 1 129

Figura 7-2 Croquis del aligeramiento de la sección transversal de la muestra F. (Fuente propia) 132

Figura 7-3 Rigidez estática y dinámica en Fase 1..... 134

Figura 7-4 Rigidez estática – Altura de Caída Crítica en Fase 1..... 135

Figura 7-5 Rigidez dinámica – Altura de Caída Crítica en Fase 1..... 135

Figura 7-6 Curva Espesor - Altura de Caída Crítica en muestras tipo A..... 139

Figura 7-7 Curva Espesor Altura de Caída Crítica en muestras tipo B..... 140

Figura 7-8 Figura 2 Curva Espesor- Altura de Caída Crítica en muestras tipo C.. 141

Figura 7-9 Curvas Espesor - Altura de Caída Crítica en muestras tipo A, B y C. . 141

Figura 7-10 Espesor - Altura de Caída Crítica en muestras tipo A, B y C..... 143

Figura 7-11 Espesor - Módulo de rigidez estática Cest en muestras tipo A, B y C.146

Figura 7-12 Altura de caída crítica - Módulo de rigidez estática Cest en muestras tipo A, B y C. 148

Figura 8-1 Evolución del coste en función del espesor en la Fase 2. (Fuente: elaboración propia)..... 165

Figura 8-2 Altura de caída crítica – Coste para muestras de la fase 2 (Fuente: elaboración propia)..... 166

Figura 8-3 Eficiencia y coste de las muestras en la fase 2. (Fuente: elaboración propia) 170

12.2 ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 4-1 Ejemplos de materiales de amortiguación de impacto empleados normalmente y sus correspondientes alturas críticas de caída, y notas (Fuente: Norma EN 1176-1)</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 4-2 Probabilidad de sufrir lesiones en la cabeza para un HIC de 1000 para un adulto masculino medio (Fuente: Elaboración propia).....</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 5-1 Parámetros de ensayo para la determinación del módulo de rigidez estática C_{est} (Fuente: ADIF)</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 5-2 Parámetros de ensayo para la determinación del módulo de rigidez dinámico C_{din} (Fuente: ADIF)</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 5-3 Características Muestra A (Fuente: elaboración propia).....</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 5-4 Características Muestra B (Fuente: elaboración propia).....</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 5-5 Características Muestra C (Fuente: elaboración propia)</i>	<i>74</i>
<i>Tabla 5-6 Características Muestra D (Fuente: elaboración propia)</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 5-7 Características Muestra E (Fuente: elaboración propia).....</i>	<i>76</i>
<i>Tabla 5-8 Características Muestra F (Fuente: elaboración propia).....</i>	<i>78</i>
<i>Tabla 5-9 Características Muestra G (Fuente: elaboración propia)</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 5-10 Características Muestra H (Fuente: elaboración propia)</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 5-11 Resumen de las características de las muestras de la fase 1 (Fuente: elaboración propia)</i>	<i>80</i>
<i>Tabla 5-12 Características Muestras Tipo A (Fuente: elaboración propia)</i>	<i>82</i>
<i>Tabla 5-13 Características Muestras Tipo B (Fuente: elaboración propia)</i>	<i>83</i>
<i>Tabla 5-14 Características Muestras Tipo C (Fuente: elaboración propia).....</i>	<i>85</i>
<i>Tabla 6-1 Resultado ensayo determinación de la altura de caída crítica por puntos. Muestra A (Fuente: Sanpe ingeniería)</i>	<i>92</i>
<i>Tabla 6-2 Resultados muestra A (Fuente: elaboración propia)</i>	<i>93</i>
<i>Tabla 6-3 Resultado ensayo determinación de la altura de caída crítica por puntos. Muestra B (Fuente: Sanpe ingeniería)</i>	<i>94</i>
<i>Tabla 6-4 Resultados muestra B (Fuente: elaboración propia)</i>	<i>95</i>
<i>Tabla 6-5 Resultado ensayo determinación de la altura de caída crítica por puntos. Muestra C (Fuente: Sanpe ingeniería)</i>	<i>96</i>
<i>Tabla 6-6 Resultados muestra C (Fuente: elaboración propia)</i>	<i>97</i>



<i>Tabla 6-7 Resultado ensayo determinación de la altura de caída crítica por puntos. Muestra D (Fuente: Sanpe ingeniería).....</i>	98
<i>Tabla 6-8 Resultados muestra D (Fuente: elaboración propia).....</i>	99
<i>Tabla 6-9 Resultado ensayo determinación de la altura de caída crítica por puntos. Muestra E (Fuente: Sanpe ingeniería).....</i>	100
<i>Tabla 6-10 Resultados muestra E (Fuente: elaboración propia).....</i>	101
<i>Tabla 6-11 Resultado ensayo determinación de la altura de caída crítica por puntos. Muestra F (Fuente: Sanpe ingeniería).....</i>	102
<i>Tabla 6-12 Resultados muestra F (Fuente: elaboración propia).....</i>	103
<i>Tabla 6-13 Resultado ensayo determinación de la altura de caída crítica por puntos. Muestra G (Fuente: Sanpe ingeniería).....</i>	104
<i>Tabla 6-14 Resultados muestra G (Fuente: elaboración propia).....</i>	105
<i>Tabla 6-15 Resultado ensayo determinación de la altura de caída crítica por puntos. Muestra H (Fuente: Sanpe ingeniería).....</i>	106
<i>Tabla 6-16 Resultados muestra H (Fuente: elaboración propia).....</i>	107
<i>Tabla 6-17 Resultado ensayo determinación de la altura de caída crítica por puntos. Muestra A-6 (Fuente: Sanpe ingeniería).....</i>	108
<i>Tabla 6-18 Resultados muestra A-6 (Fuente: elaboración propia).....</i>	109
<i>Tabla 6-19 Resultado ensayo determinación de la altura de caída crítica por puntos. Muestra A-8 (Fuente: Sanpe ingeniería).....</i>	110
<i>Tabla 6-20 Resultados muestra A-8 (Fuente: elaboración propia).....</i>	111
<i>Tabla 6-21 Resultado ensayo determinación de la altura de caída crítica por puntos. Muestra A-10 (Fuente: Sanpe ingeniería).....</i>	112
<i>Tabla 6-22 Resultados muestra A-10 (Fuente: elaboración propia).....</i>	113
<i>Tabla 6-23 Resultado ensayo determinación de la altura de caída crítica por puntos. Muestra B-6 (Fuente: Sanpe ingeniería).....</i>	114
<i>Tabla 6-24 Resultados muestra B-6 (Fuente: elaboración propia).....</i>	115
<i>Tabla 6-25 Resultado ensayo determinación de la altura de caída crítica por puntos. Muestra B-8 (Fuente: Sanpe ingeniería).....</i>	116
<i>Tabla 6-26 Resultados muestra B-8 (Fuente: elaboración propia).....</i>	117
<i>Tabla 6-27 Resultado ensayo determinación de la altura de caída crítica por puntos. Muestra B-10 (Fuente: Sanpe ingeniería).....</i>	118
<i>Tabla 6-28 Resultados muestra B-10 (Fuente: elaboración propia).....</i>	119

<i>Tabla 6-29 Resultado ensayo determinación de la altura de caída crítica por puntos. Muestra C-6 (Fuente: Sanpe ingeniería).....</i>	<i>120</i>
<i>Tabla 6-30 Resultados muestra C-6 (Fuente: elaboración propia).....</i>	<i>121</i>
<i>Tabla 6-31 Resultado ensayo determinación de la altura de caída crítica por puntos. Muestra C-8 (Fuente: Sanpe ingeniería).....</i>	<i>122</i>
<i>Tabla 6-32 Resultados muestra C-8 (Fuente: elaboración propia).....</i>	<i>123</i>
<i>Tabla 6-33 Resultado ensayo determinación de la altura de caída crítica por puntos. Muestra C-10 (Fuente: Sanpe ingeniería).....</i>	<i>124</i>
<i>Tabla 6-34 Resultados muestra C-10 (Fuente: elaboración propia).....</i>	<i>125</i>
<i>Tabla 7-1 Incrementos de amortiguación y de material para las muestras del tipo A, B y C.....</i>	<i>144</i>
<i>Tabla 7-2 Incrementos del módulo de rigidez estática y de material para las muestras del tipo A, B y C.....</i>	<i>147</i>
<i>Tabla 8-1 Precios materiales empleados (Fuente: Vulgalia).....</i>	<i>152</i>
<i>Tabla 8-2 Masa de las muestras Fase 1 (Fuente: LADICIM).....</i>	<i>153</i>
<i>Tabla 8-3 Peso específico del caucho empleado (Fuente: Vulgalia).....</i>	<i>153</i>
<i>Tabla 8-4 Resumen de las características de las muestras empleadas en la fase 1 y 2 (Fuente: elaboración propia).....</i>	<i>154</i>
<i>Tabla 8-5 Relación de pesos necesarios de cada componente en muestras de la Fase 1 (Fuente: elaboración propia).....</i>	<i>158</i>
<i>Tabla 8-6 Relación de pesos necesarios de cada componente en muestras de la Fase 2 (Fuente: elaboración propia).....</i>	<i>158</i>
<i>Tabla 8-7 Costes desglosados y total por m2 de las muestras de la fase 1 (Fuente: elaboración propia).....</i>	<i>159</i>
<i>Tabla 8-8 Costes desglosados y total por m2 de las muestras de la fase 2 (Fuente: elaboración propia).....</i>	<i>159</i>
<i>Tabla 8-9 Porcentaje respecto al coste total de los materiales descompuestos, y de las capas. Fase 1 (Fuente: elaboración propia).....</i>	<i>160</i>
<i>Tabla 8-10 Porcentaje respecto al coste total de los materiales descompuestos, costes fijos y variables en Fase 2 (Fuente: elaboración propia).....</i>	<i>163</i>
<i>Tabla 8-11 Evolución costes variables y costes totales en la Fase 2 (Fuente: elaboración propia).....</i>	<i>164</i>
<i>Tabla 8-12 Variaciones de la altura de caída crítica y el coste de las muestras de la Fase 2 (Fuente: elaboración propia).....</i>	<i>168</i>



Tabla 8-13 Parámetro R y coste de las muestras en fase 2. (Fuente: elaboración propia)..... 169

12.3 ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 4-1 Pavimento de césped natural en Parque Infantil la Residencia, Santander (Fuente: Sanpe Ingeniería).....</i>	<i>27</i>
<i>Ilustración 4-2 Pavimento de corteza instalado Parque Infantil de Rio Miño, Cambre (Fuente: El Entorno Metropolitano)</i>	<i>28</i>
<i>Ilustración 4-3 Suelo de arena instalado en Parque Infantil de Castrelos, Vigo (Fuente: Sanpe Ingeniería)</i>	<i>29</i>
<i>Ilustración 4-4 Suelo de arena instalado en un Parque Infantil (Fuente: Sanpe Ingeniería)</i>	<i>29</i>
<i>Ilustración 4-5 Muestra de gravilla (Fuente: Sanpe Ingeniería)</i>	<i>30</i>
<i>Ilustración 4-6 Muestra de losa prefabricada aligerada (Fuente: Sanpe Ingeniería).....</i>	<i>31</i>
<i>Ilustración 4-7 Pavimento de losetas de caucho instalado en un Parque infantil (Fuente: Vulgalia).....</i>	<i>31</i>
<i>Ilustración 4-8 Muestra de caucho continuo (Fuente: Sanpe Ingeniería).....</i>	<i>32</i>
<i>Ilustración 4-9 Pavimento de caucho continuo en Parque Infantil de Camarreal, Santander (Fuente: Sanpe Ingeniería).....</i>	<i>32</i>
<i>Ilustración 4-10 Pavimento de caucho continuo en Parque Infantil de Gamazo, Santander (Fuente: Sanpe Ingeniería).....</i>	<i>33</i>
<i>Ilustración 4-11 Muestra de césped artificial (Fuente: Sanpe Ingeniería)</i>	<i>33</i>
<i>Ilustración 4-12 Sistema de base amortiguadora de corcho con aligeramientos y sistema de machihembrada, cubierta por césped artificial.</i>	<i>34</i>
<i>Ilustración 4-13 Pavimento de césped artificial instalado en Parque Infantil de Plaza de Rollo, Mayorga de Campos (Fuente: Propia)</i>	<i>34</i>
<i>Ilustración 4-14 Pavimento de chilsplay instalado en Parque Infantil Tetuán III, Santander (Fuente: Sanpe Ingeniería).....</i>	<i>35</i>
<i>Ilustración 4-15 Muestra de recubrimiento de base amortiguadora (Fuente: Sanpe Ingeniería)</i>	<i>35</i>
<i>Ilustración 4-16 Muestra de base amortiguadora formada por diferente corchos reciclados Fuente: Sanpe Ingeniería)</i>	<i>36</i>
<i>Ilustración 4-17 Muestra de dos granulometrías diferentes de caucho SBR reciclado (Fuente: Sanpe Ingeniería)</i>	<i>45</i>
<i>Ilustración 4-18 Muestra de capa de 10 mm de espesor de EPDM vulcanizado en color marrón mezclado con resina (Fuente: Sanpe Ingeniería).....</i>	<i>46</i>
<i>Ilustración 5-1 Cabeza maniquí con acelerómetro triaxial (Fuente: Sanpe Ingeniería)</i>	<i>60</i>

<i>Ilustración 5-2 Sistema de liberación (Fuente: Sanpe Ingeniería)</i>	61
<i>Ilustración 5-3 Realización de un ensayo de determinación de la altura de caída crítica "in situ" con un trípode (Fuente: Ingeniería Sanpe).....</i>	62
<i>Ilustración 5-4 Termo-higrómetro (Fuente: Sanpe Ingeniería).....</i>	63
<i>Ilustración 5-5 Disposición del ensayo de rigidez (Fuente: LADICIM)</i>	67
<i>Ilustración 5-6 Muestra A. Planta y sección (Fuente: elaboración propia)</i>	72
<i>Ilustración 5-7 Muestra B. Planta y sección (Fuente: elaboración propia)</i>	73
<i>Ilustración 5-8 Muestra C. Planta y sección (Fuente: elaboración propia).....</i>	74
<i>Ilustración 5-9 Muestra C. Planta y sección (Fuente: elaboración propia)</i>	75
<i>Ilustración 5-10 Muestra D. Planta y sección (Fuente: elaboración propia)</i>	76
<i>Ilustración 5-11 Muestra D. Detalle parte posterior (Fuente: elaboración propia) ...</i>	76
<i>Ilustración 5-12 Muestra F. Planta y sección (Fuente: elaboración propia)</i>	77
<i>Ilustración 5-13 Muestra F. Detalle parte posterior (Fuente: elaboración propia) ...</i>	77
<i>Ilustración 5-14 Muestra G. Planta y sección (Fuente: elaboración propia).....</i>	78
<i>Ilustración 5-15 Muestra H. Planta y sección (Fuente: elaboración propia).....</i>	79
<i>Ilustración 5-16 Muestra A-6. Planta y sección (Fuente: elaboración propia).....</i>	82
<i>Ilustración 5-17 Muestra A-8. Planta y sección (Fuente: elaboración propia).....</i>	82
<i>Ilustración 5-18 Muestra A-10. Planta y sección (Fuente: elaboración propia).....</i>	83
<i>Ilustración 5-19 Muestra B-6. Planta y sección (Fuente: elaboración propia).....</i>	84
<i>Ilustración 5-20 Muestra B-8. Planta y sección (Fuente: elaboración propia).....</i>	84
<i>Ilustración 5-21 Muestra B-10. Planta y sección (Fuente: elaboración propia)</i>	84
<i>Ilustración 5-22 Muestra C-6. Planta y sección (Fuente: elaboración propia).....</i>	85
<i>Ilustración 5-23 Muestra C-8. Planta y sección (Fuente: elaboración propia).....</i>	86
<i>Ilustración 5-24 Muestra C-10. Planta y sección (Fuente: elaboración propia).....</i>	86
 <i>Ilustración 7-1 Ensayo determinación de la altura de caída de caída crítica de losetas de caucho prefabricadas. (Fuente: Sanpe Ingeniería).....</i>	 131
 <i>Ilustración 11-1 Conjunto de muestras de la Fase 1 (Fuente: elaboración propia)</i>	 182
<i>Ilustración 11-2 Detalle disposición de ensayo de rigidez en Fase 1 (Fuente: LADICIM)</i>	183



Ilustración 11-3 Detalle disposición de ensayo de rigidez en Fase 1. Muestra A (Fuente: LADICIM)..... 183

Ilustración 11-4 Pesaje de muestras en Fase 1. Muestra A (Fuente: LADICIM)... 184

Ilustración 11-5 Disposición de ensayo de altura de caída crítica en Fase 1. Muestra A (Fuente: elaboración propia) 184

Ilustración 11-6 Conjunto de muestras Fase 2 en el laboratorio de LADICIM (Fuente: elaboración propia) 185

Ilustración 11-7 Disposición de ensayo de rigidez estática en Fase 2. Muestra B-6. (Fuente: LADICIM)..... 185

Ilustración 11-8 Colocación de las probetas sobre marco en Fase 2 (Fuente: elaboración propia) 186

Ilustración 11-9 Disposición de equipo de ensayo de determinación de altura de caída y muestras preparadas para ensayo. Fase 2 (Fuente: elaboración propia)..... 186

Ilustración 11-10 Disposición de ensayo de determinación de altura de caída crítica en Fase 2. Muestra B-8 (Fuente: elaboración propia) 187

Ilustración 11-11 Conjunto de muestras empleadas almacenadas una vez finalizados todos los ensayos (Fuente: elaboración propia)..... 187