



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES
Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras
Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación

TRABAJO FIN DE GRADO

Diseño y ensayo de un demostrador de laboratorio para la evaluación numérica y experimental de la disipación de la energía de impacto en un sistema multimaterial basado en neumáticos reciclados

Grado en Ingeniería Mecánica

Autor: D. Pablo López Medina

Tutores: D. Felipe García Sánchez
D. Joaquín González Vega

MÁLAGA, SEPTIEMBRE de 2023

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, mi especial agradecimiento a mis tutores D. Felipe García Sánchez y D. Joaquín González Vega, así como al profesor D. Germán Castillo López, por su gran labor desempeñada en la elaboración de este trabajo, brindándome importantes consejos, resolviendo eficazmente las dudas que me han surgido a lo largo del proceso y preocupándose por que tuviese un buen aprendizaje y sacara valiosas lecciones de esta experiencia.

A continuación, mi agradecimiento a D. José Bernardo Beltrán Ramos, técnico superior de apoyo a la docencia MMCyTE, por su implicación en el desarrollo de este trabajo, disponiéndolo todo para poder ejecutar eficazmente los ensayos y la fabricación de los especímenes.

Además, agradecer a todos los profesores que han aportado su granito de arena a lo largo de estos cuatro años por haber contribuido a que haya podido llegar hasta aquí.

Por último, mi agradecimiento a mi familia y amigos, especialmente a mis padres y a mi tía, cuyo apoyo ha sido determinante durante esta etapa de mi vida.

RESUMEN

Actualmente, las grandes cantidades de residuos generados por los neumáticos que han cumplido su vida útil suponen un gran problema medioambiental, puesto que anualmente se generan miles de toneladas de estos residuos, que no son biodegradables y además arden con gran facilidad, suponiendo un riesgo grave de incendios.

Ante esta situación, este trabajo propone dar utilidad a estos residuos, implantándolos en los guardarraíles de las carreteras, de modo que de esta combinación surja un sistema compuesto por dos materiales, capaz de disipar mayor cantidad de energía en caso de impacto, por lo que aumenta la seguridad proporcionada por estos elementos.

Para realizar dicha labor, se va a estudiar cómo generar un modelo numérico capaz de cuantificar la reducción en los efectos causados por un impacto al añadir al sistema de estudio un material viscoelástico obtenido a partir de neumáticos desechados.

En esta primera fase, se trabajará con un modelo de dimensiones reducidas, buscando obtener una buena correlación de resultados entre el modelo numérico y el modelo experimental. El objetivo es desarrollar un modelo con el que se obtengan resultados satisfactorios para poder dar el siguiente paso: calcular un modelo numérico a escala real, cuyo estudio experimental es económicamente inviable por ser demasiado costoso.

Palabras clave:

Hiperelasticidad, Viscoelasticidad, LS Dyna®, Modelo de Bergström-Boyce, Neumáticos fuera de uso (NFU), Aglomerado, Hourglassing, Impacto, Método de elementos finitos (MEF), Dinámica explícita

ABSTRACT

Nowadays, big amounts of end-of-life tyres residues represent a great environmental issue, because thousands of tonnes of such residues, which are not biodegradable and even they burn easily, meaning a serious fire risk, are generated annually.

In this situation, a new use for those residues is proposed in this document, by adding them to guardrails, so a two-material-system, capable of dispelling more impact energy, is formed. In that way, guardrails are thought to be safer.

To achieve that objective, a numerical model will be studied, so it will be possible to quantify the reduction of impact effects when a viscoelastic material, obtained from end-of-life tyres, is added.

First of all, a model of limited dimensions will be used, so a good numerical correlation between both, the numerical and the experimental model, is obtained. Later, when the results of the numerical model are satisfactory, will be time for the next step: to obtain a real-scale model, so numerical results are calculated without needing an experimental model, which would be too expensive.

Keywords:

Hyperelasticity, Viscoelasticity, LS Dyna®, Bergstöm-Boyce model, End-of-life tyres (ELT), Agglomerate, Hourglassing, Impact, Finite element method (FEM), Explicit dynamics

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	I
RESUMEN.....	III
ABSTRACT.....	V
1. INTRODUCCIÓN.	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Objetivos.	2
1.3 Plan de trabajo.....	3
2. ASPECTOS TEÓRICOS.....	5
2.1 Criterio de lesión encefálica (<i>HIC</i>).	5
2.2 Fuerza máxima.....	7
2.3 El modelo de comportamiento de Bergström-Boyce.	7
2.4 Generalidades del MEF.....	9
2.5 Problemas numéricos derivados de la integración reducida.....	10
3. ESTUDIO EXPERIMENTAL.	13
3.1 Campaña de ensayos.	13
3.2 Cadena de medida.	16
3.3 Geometría de los especímenes.	19
3.4 Materiales empleados.....	21
3.5 Proceso de fabricación de los especímenes.....	22
3.5.1 Especímenes simples.....	22
3.5.2 Especímenes compuestos.....	23
3.6 Ensayos estáticos de caracterización.....	24
3.6.1 Ensayo de tracción.	24
3.6.2 Ensayo de flexión en cuatro puntos.....	29
3.7 Resultados experimentales de los ensayos de impacto.	33
4. ESTUDIO NUMÉRICO.	37
4.1 Introducción.	37
4.2 Puesta a punto del modelo.....	39
4.2.1 Condiciones de contorno.....	39
4.2.2 Propiedades de los materiales.	41
4.2.3 Tipo de elemento.	42
4.2.4 Análisis de convergencia de malla.	47
4.2.5 Determinación del paso de tiempo.	50
4.3 Resultados finales.....	52

5. CORRELACIÓN NUMÉRICO-EXPERIMENTAL.....	58
6. CONCLUSIONES.	62
7. LÍNEAS FUTURAS.	64
8. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.	65
ANEXO 1. FICHA TÉCNICA DEL ACERO.	67
ANEXO 2. ENSAYOS DE TRACCIÓN.	68
Probetas transversales.	68
Probetas longitudinales.	71
ANEXO 3. ENSAYO DE FLEXIÓN EN CUATRO PUNTOS.....	74
Sección central.	74
Sección bajo carga.....	75
ANEXO 4. ENSAYOS DINÁMICOS.	77
Viga simple.....	77
Viga compuesta.	81
ANEXO 5. RESULTADOS OBTENIDOS CON EL MODELO DE ELEMENTOS TIPO LÁMINA.....	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Distribución de los diferentes usos que se le han dado al caucho de NFU. [7]	1
Figura 2.1: Ilustración de dos fenómenos de impacto diferentes.	5
Figura 2.2: Representación esquemática del modelo BB.	8
Figura 2.3: Distribución de los nodos en elementos lineales y cuadráticos.	10
Figura 2.4: Deformación esperada en un elemento sometido a flexión pura.	11
Figura 2.5: Deformación causada por el <i>hourglassing</i> .	11
Figura 2.6: Caso extremo de deformación debido al <i>hourglassing</i> .	11
Figura 3.1: Configuración de los ensayos de impacto.	13
Figura 3.2: Estado de la viga nº1 tras el impacto a 4 m/s.	15
Figura 3.3: Apoyo de la viga doble (izquierda) y simple (derecha).	16
Figura 3.4: Máquina de ensayo modelo <i>CEAST 9350</i> .	17
Figura 3.5: Combinaciones de velocidades y masas que es posible ensayar con la máquina del estudio. [14]	18
Figura 3.6: Dardo impactor (izquierda) y carro porta pesas (derecha).	18
Figura 3.7: Croquis de la sección de la viga (cotas en mm).	19
Figura 3.8: Viga del ensayo de impacto.	20
Figura 3.9: Aglomerados de caucho reciclado y poliuretano (izquierda) y proceso de unión del aglomerado a la viga (derecha).	20
Figura 3.10: Disposición de los puntos de soldadura.	22
Figura 3.11: Máquina de soldadura por puntos modelo <i>Praxair MPP-30-M</i> (izquierda) y proceso de soldadura por puntos (derecha).	23
Figura 3.12: Geometría de las probetas del ensayo de tracción (cotas en mm).	24
Figura 3.13: Disposición de la probeta y los dispositivos de medida en los momentos previos al ensayo.	26

Figura 3.14: Curvas de tensión-deformación elástica de los ensayos con probetas transversales.....	27
Figura 3.15: Curvas de tensión-deformación elástica de los ensayos con probetas longitudinales.	28
Figura 3.16: Configuración del ensayo de flexión en cuatro puntos.	29
Figura 3.17: Disposición de los aparatos de medida durante el ensayo de flexión en cuatro puntos.	30
Figura 3.18: Ajuste lineal de la curva fuerza-desplazamiento.....	31
Figura 3.19: Resultados experimentales obtenidos con las vigas nº4 ,5 y 6 con una velocidad de impacto de 2 m/s y una masa de 5.3 kg.....	34
Figura 3.20: Resultados experimentales obtenidos con la viga nº2, con una velocidad de impacto de 1 m/s y una masa creciente en incrementos de 0.5 kg de 5.3 a 7.3 kg.....	35
Figura 3.21: Estado de las soldaduras de la viga nº2 tras los ensayos de impacto.....	35
Figura 4.1: Resumen de las aplicaciones del método explícito e implícito. [10].....	38
Figura 4.2: Elementos que componen el modelo y definición de los planos de simetría.	40
Figura 4.3: Estado de deformación de la viga para el modelo E1H1.	43
Figura 4.4: Estado de deformación de la viga para el modelo E1H3.	44
Figura 4.5: Curvas de aceleración frente al tiempo obtenidas con los modelos E1H1 y E1H3.....	45
Figura 4.6: Estado de deformación de la viga para los modelos E2H1 (izquierda) y E1H5 (derecha).	45
Figura 4.7: Curvas de aceleración frente al tiempo obtenidas con los modelos E1H5 y E2H1.....	46
Figura 4.8: Resultado de energía de <i>hourglassing</i> obtenido con el modelo E1H5.....	46
Figura 4.9: Tamaños de malla estudiados. De izquierda a derecha son: malla A, malla B y malla C.....	48

Figura 4.10: Resultados de aceleración obtenidos con el modelo E2H1.	48
Figura 4.11: Resultados de aceleración obtenidos con el modelo E3H1.....	49
Figura 4.12: Variación del paso de tiempo en cada instante de la simulación correspondiente a dos tamaños de malla.	51
Figura 4.13: Comparación entre el resultado de la viga nº1 y el del modelo numérico inicial.	52
Figura 4.14: Comparación entre los resultados obtenidos con las modificaciones de las hipótesis A y C y el modelo numérico inicial.	55
Figura 4.15: Comparación entre el resultado de la viga nº1 y el de la hipótesis B modificada.	55
Figura 4.16: Comparación entre el resultado de la viga nº1 y el de la hipótesis F modificada.	56
Figura 4.17: Comparación entre el resultado de la viga nº1 y el del modelo numérico definitivo.....	57
Figura 5.1: Resultados numéricos y experimentales obtenidos con una viga de acero para un impacto a 2 m/s y una masa del impactor de 5.3 kg.	58
Figura 5.2: Resultados numéricos y experimentales obtenidos con una viga compuesta para un impacto a 2 m/s y una masa del impactor de 5.3 kg.	60
Figura A.1: Ficha técnica del acero.	67
Figura A.2: Curva tensión-deformación de la probeta T01.	68
Figura A.3: Curva tensión-deformación de la probeta T02.	68
Figura A.4: Curva tensión-deformación de la probeta T03.	69
Figura A.5: Curva tensión-deformación de la probeta T04.	69
Figura A.6: Curva tensión-deformación de la probeta T05.	70
Figura A.7: Curva tensión-deformación de la probeta T06.	70
Figura A.8: Curva tensión-deformación de la probeta L01.	71
Figura A.9: Curva tensión-deformación de la probeta L02.	71

Figura A.10: Curva tensión-deformación de la probeta L03.....	72
Figura A.11: Curva tensión-deformación de la probeta L04.....	72
Figura A.12: Curva tensión-deformación de la probeta L05.....	73
Figura A.13: Curva tensión-deformación de la probeta L06.....	73
Figura A.14: Relación fuerza-desplazamiento en la sección central de la viga nº4.....	74
Figura A.15: Relación fuerza-desplazamiento en la sección central de la viga nº5.....	74
Figura A.16: Relación fuerza-desplazamiento en la sección central de la viga nº6.....	75
Figura A.17: Relación fuerza-desplazamiento promedio en las secciones bajo carga de la viga nº4.....	75
Figura A.18: Relación fuerza-desplazamiento promedio en las secciones bajo carga de la viga nº5.....	76
Figura A.19: Relación fuerza-desplazamiento promedio en las secciones bajo carga de la viga nº6.....	76
Figura A.20: Resultados del ensayo con la viga nº1 con una masa de 5.3 kg a 2 m/s. ..	77
Figura A.21: Resultados del ensayo con la viga nº2 con una masa de 5.3 kg a 1 m/s. ..	77
Figura A.22: Resultados del ensayo con la viga nº2 con una masa de 5.8 kg a 1 m/s. ..	78
Figura A.23: Resultados del ensayo con la viga nº2 con una masa de 6.3 kg a 1 m/s. ..	78
Figura A.24: Resultados del ensayo con la viga nº2 con una masa de 6.8 kg a 1 m/s. ..	79
Figura A.25: Resultados del ensayo con la viga nº2 con una masa de 7.3 kg a 1 m/s. ..	79
Figura A.26: Resultados del ensayo con la viga nº4 con una masa de 5.3 kg a 2 m/s. ..	80
Figura A.27: Resultados del ensayo con la viga nº5 con una masa de 5.3 kg a 2 m/s. ..	80
Figura A.28: Resultados del ensayo con la viga nº6 con una masa de 5.3 kg a 2 m/s. ..	81
Figura A.29: Resultados del ensayo con la viga nº7 con una masa de 5.3 kg a 2 m/s. ..	81
Figura A.30: Comparación entre un modelo sólido (izquierda) y un modelo lámina (derecha).....	82

Figura A.31: Comparación de los resultados experimentales y numéricos obtenidos con un modelo tipo lámina.	83
---	----

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Parámetros característicos del modelo BB en LS Dyna®. [13]	8
Tabla 3.1: Características del impactor.	18
Tabla 3.2: Parámetros tomados para el modelo BB. [9]	22
Tabla 3.3: Dimensiones obtenidas para probetas transversales.	25
Tabla 3.4: Dimensiones obtenidas para probetas longitudinales.	25
Tabla 3.5: Módulos de elasticidad obtenidos en los ensayos de tracción.	28
Tabla 3.6: Resultados del ensayo de flexión en cuatro puntos.	33
Tabla 4.1; Nomenclatura utilizada para designar las diferentes formulaciones estudiadas.	43
Tabla 4.2: Comparación entre los tres tamaños de malla calculados.	49
Tabla 5.1: Resumen de resultados experimentales obtenidos con una viga de acero.	59
Tabla 5.2: Comparación entre los resultados numéricos y experimentales obtenidos con una viga de acero.	59
Tabla 5.3: Comparación entre los resultados numéricos y experimentales obtenidos con una viga compuesta.	61

1. INTRODUCCIÓN.

1.1 Antecedentes.

Actualmente, el elevado uso al que se ven sometidos los vehículos, unido a su importante volumen como producto de consumo, supone un gran problema medioambiental, ya que anualmente, entre otras cosas, se generan millones de toneladas de residuos provenientes de los neumáticos que cumplen su vida útil, también llamados neumáticos fuera de uso o NFU para abreviar.

De acuerdo con el ETRMA (Asociación Europea de Fabricantes de Neumáticos y Caucho) [7], en 2019 se generaron en Europa 3.55 millones de toneladas de caucho proveniente de NFU. En la figura 1.1 aparece representada la cantidad de este material que fue reutilizado.

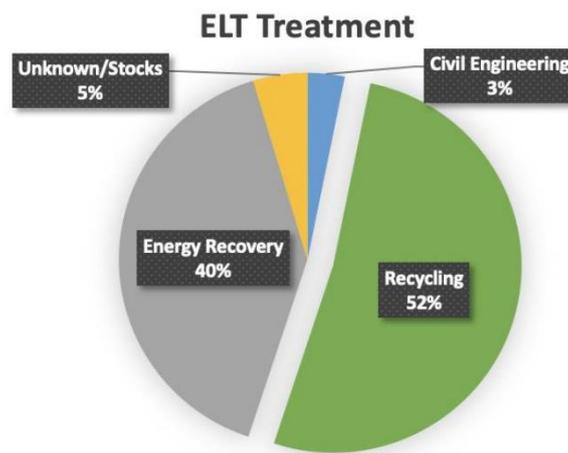


Figura 1.1: Distribución de los diferentes usos que se le han dado al caucho de NFU. [7]

En dicha figura, se puede observar cuántas toneladas se han destinado a la recuperación de energía, reciclaje o ingeniería civil, y también la cantidad de este material que ha sido almacenado o cuya reutilización se desconoce, lo que quiere decir que no ha sido bien aprovechado. Esta última cantidad es la realmente preocupante, pues alrededor de 165000 toneladas de caucho siguen sin ser tratadas y perjudicando al medioambiente. No obstante, cabe destacar que la evolución en los últimos años es positiva, pues el caucho sin ser aprovechado pasó de ser un 8% en 2017 [5] a conformar el 5% en 2019.

En este contexto, en el que se busca seguir mejorando estas cifras, surgió, previamente a la realización de este trabajo, una línea de investigación cuyo objetivo es estudiar la

posibilidad de implantar un aglomerado de caucho procedente de NFU y poliuretano en los guardarraíles de las carreteras, de tal manera que esta combinación de materiales produzca un aumento en la disipación de energía del sistema en caso de impacto. Asimismo, se pretende dar utilidad a estos miles de toneladas de residuos que suponen un gran problema y contribuir a una mejora en términos de seguridad vial.

En esta tarea, surgen dificultades, pues el aglomerado es un material que, bajo las condiciones de carga que son objeto de interés en este trabajo, presenta un comportamiento visco-hiperelástico altamente no lineal, por lo que debe ser estudiado y caracterizado antes de empezar a trabajar en su implantación.

En trabajos precedentes, se han analizado las propiedades de este aglomerado mediante métodos experimentales y se ha hallado un modelo que caracteriza el comportamiento de dicho material (véase [4, 5]).

1.2 Objetivos.

El objeto de este estudio es obtener un modelo numérico mediante el método de elementos finitos (MEF en adelante) que represente, de forma fiable, los efectos originados por una colisión con un sistema compuesto por acero y aglomerado de caucho reciclado. Este modelo numérico se empleará para recrear, en un futuro, una situación a escala real, cuyo estudio experimental es demasiado costoso para ser llevado a cabo.

Otro aspecto importante de este trabajo es diseñar una geometría para las vigas que permita incluir, de una forma razonablemente simple, el aglomerado.

Para evaluar el modelo numérico se realizarán una serie de ensayos dinámicos de impacto en el laboratorio de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras, con diferentes condiciones de ensayo, cuyos resultados se tratarán de reproducir de forma numérica, afinando el modelo todo lo posible para que exista correlación entre ambos resultados. En esta primera etapa de la investigación, sólo se considerará el comportamiento elástico del acero, evitando condiciones de carga que produzcan la plastificación del mismo. Además, tanto la parte experimental como numérica se realizarán en dos fases bien definidas.

En la primera fase, los especímenes serán vigas formadas únicamente por acero.

En la segunda fase, se añadirá a las vigas de acero el aglomerado de caucho suministrado por la empresa GENAN®, que se describirá más adelante.

Por último, a la vista de los resultados obtenidos, se decidirá si el modelo cumple con las expectativas o si, por el contrario, es preciso seguir desarrollando más ensayos y continuar con la labor de puesta a punto del modelo numérico.

Además de la correlación numérico-experimental, otro punto importante de la investigación es cuantificar la reducción de la severidad del impacto gracias a la adhesión del aglomerado.

1.3 Plan de trabajo.

Para cumplir los objetivos anteriormente descritos, el plan de trabajo desarrollado es el que se describe a continuación:

- Estudio de los trabajos previos. Es preciso entender los pasos que ya se han dado en esta investigación. Para ello, se han analizado los trabajos de fin de grado y de fin de máster ya publicados sobre esta línea de investigación [4, 5, 9].
- Familiarización con el programa para el análisis numérico de los impactos. Se ha estudiado el funcionamiento del software de cálculo numérico con el que se va a trabajar, para lo que se han consultado las guías y manuales suministrados por la empresa creadora del programa, con el objetivo de adquirir destreza con el mismo. En el caso de este estudio, por una serie de razones que se enumeran más adelante, se ha optado por emplear el software LS Dyna®.
- Realización de los ensayos de caracterización de los materiales. Se han ejecutado los ensayos estáticos pertinentes para hallar las propiedades de los materiales con los que se está trabajando.
- Diseño y fabricación de las probetas del ensayo. Se han determinado todos aquellos aspectos necesarios para la obtención de los especímenes: geometría, dimensiones, proceso de fabricación y uniones.
- Realización de los ensayos de impacto. Para llevar a cabo la parte experimental del trabajo, ha sido necesario aprender cómo configurar los ensayos dinámicos de impacto, así como rescatar los resultados y exportarlos para tratarlos posteriormente.

- Depuración del modelo numérico. Se han ejecutado las modificaciones necesarias en el modelo numérico para lograr una correspondencia satisfactoria entre los resultados obtenidos con este método y los resultados experimentales.
- Cuantificación del efecto causado por la incorporación del aglomerado. Con el modelo numérico validado, se ha calculado la reducción en la severidad del impacto entre un modelo con y sin aglomerado de caucho. Para ello, se han empleado unos parámetros que serán explicados más adelante.

2. ASPECTOS TEÓRICOS.

En este apartado, se explican algunos conceptos que van a ser usados más adelante durante el desarrollo del trabajo.

2.1 Criterio de lesión encefálica (*HIC*).

El *HIC* (del inglés, *Head Injury Criterion*) es un parámetro ampliamente utilizado para probar la seguridad de los vehículos en accidentes. Mide la probabilidad de sufrir un daño encefálico grave debido a la deceleración brusca a la que es sometida una cabeza durante un accidente, algo que está estrechamente ligado con el valor máximo de dicha deceleración y el tiempo que dura ésta.

En la figura 2.1, aparecen dos registros de impacto diferentes. El caso de la derecha muestra un impacto mucho más agresivo en el que se alcanza un valor de aceleración más elevado. Por el contrario, el de la izquierda muestra uno más moderado, que se prolonga más en el tiempo. Si bien es cierto que cuanto más elevada sea la aceleración, más peligroso es el impacto, también es altamente perjudicial que éste se extienda durante cierto tiempo. De esta manera, puede ser igual de perjudicial un impacto de alta intensidad, como el primer caso analizado, o un impacto de gran duración, como el segundo caso.

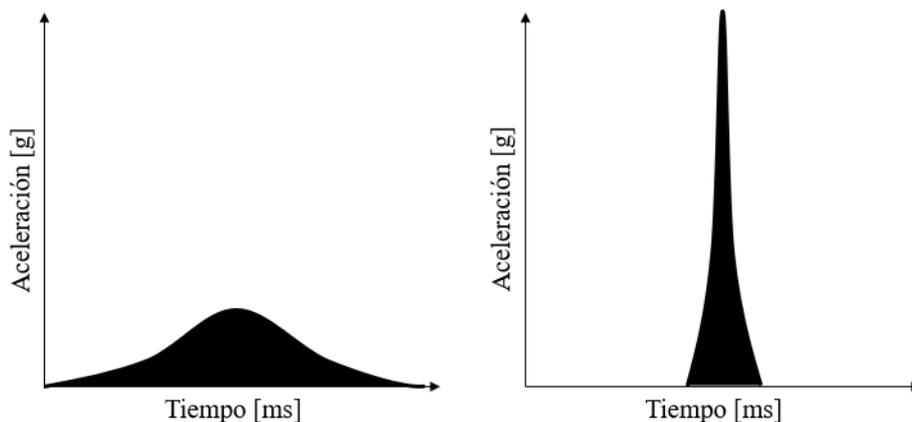


Figura 2.1: Ilustración de dos fenómenos de impacto diferentes.

Con esta comparación, se puede deducir que ambos parámetros, tiempo y aceleración, son igual de determinantes en estos fenómenos, y de ahí surge la necesidad de emplear el *HIC* para caracterizar la severidad de un impacto.

En cuanto a este trabajo, como el objetivo es analizar la posibilidad de implantar el aglomerado de caucho reciclado en los guardarraíles de las carreteras, es interesante analizar este parámetro, para ver qué capacidad tiene la viga de mitigar los efectos de la deceleración en caso de impacto.

La expresión del *HIC* es la indicada por la ecuación (2.1). [3]

$$HIC = \max_{0 \leq t_1 \leq t_2 \leq \Delta} \left\{ \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} g(t) dt \right]^{2.5} (t_2 - t_1) \right\} \quad (2.1)$$

Siendo:

$g(t)$: curva de aceleración, expresada en g (valor obtenido al dividir la aceleración entre la aceleración de la gravedad, es decir, entre 9.81 m/s^2) y en valor absoluto.

t_i : límites de integración. Dentro de esta ecuación deben ser expresados en segundos.

Siguiendo la correspondencia entre unidades, el *HIC* se expresa en segundos, aunque esta unidad se suele obviar.

El *HIC* es, por tanto, el máximo de una serie de valores que se obtienen de integrar la curva de aceleración $g(t)$ entre dos instantes de tiempo, t_1 y t_2 , a lo largo de todo el dominio. El periodo $t_2 - t_1$ es constante y define el criterio, de modo que existen diversos criterios en función de los intervalos de tiempo, siendo los más utilizados aquellos en los que el intervalo es de 15 ms (HIC_{15}) y 36 ms (HIC_{36}).

Como se ha indicado previamente, la curva de aceleración se expresa en valor absoluto, ya que es igual de perjudicial una aceleración positiva o negativa para el cerebro, por lo que esta expresión considera el daño acumulativo, a pesar de que haya fluctuaciones en el signo.

Retomando lo dicho anteriormente, las dos formas más utilizadas de calcular este parámetro son tomando intervalos de tiempo de 15 o 36 ms. No obstante, la corta duración de los impactos analizados en este trabajo no permite utilizar el *HIC* tal y como está definido en (2.1). En su lugar, se va a adecuar el parámetro a la duración de los fenómenos estudiados, de modo que se extenderá la integración a todo el tiempo del impacto. Por tanto, se va a definir un *HIC* modificado, denotado por \overline{HIC} , de acuerdo a la expresión (2.2).

$$\overline{HIC} = \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} g(t) dt \right]^{2.5} (t_2 - t_1) \quad (2.2)$$

En este caso, al haber una única integración, t_1 corresponde al instante inicial, que en todos los casos va a ser cero, y t_2 es el último instante que se considere en el impacto.

2.2 Fuerza máxima.

Además de las aceleraciones, también es interesante estudiar la fuerza máxima que se produce en el impacto, puesto que, a igualdad del resto de parámetros, una menor fuerza máxima indica un impacto menos agresivo.

Para ello, como conocemos la masa, basta con sustituir en la ecuación (2.3) y hallar el valor máximo. Esto es necesario porque, como se verá más adelante, en el método numérico no es posible obtener directamente la fuerza, sino que el resultado proporcionado por el programa es la aceleración.

$$F(t) = m \cdot a(t) \quad (2.3)$$

Siendo:

$F(t)$: fuerza generada durante el impacto, expresada en función del tiempo.

m : masa del elemento con el que se golpea la viga, tanto en el ensayo como en las simulaciones.

$a(t)$: aceleración que experimenta el elemento que golpea la viga, en función del tiempo.

2.3 El modelo de comportamiento de Bergström-Boyce.

Como ya se ha anticipado, el aglomerado de caucho reciclado y poliuretano que se va a estudiar en este trabajo tiene un comportamiento altamente no lineal muy dependiente del tiempo, con grandes deformaciones y cuya rigidez depende tanto de la fuerza como de la velocidad de deformación. Todo esto complica la labor de caracterización de este material: no es un material viscoelástico puro, ya que las grandes deformaciones son incompatibles con este tipo de materiales; tampoco es un material hiperelástico puro, pues

el cambio de rigidez en función de la velocidad de deformación no queda reflejado en las leyes de comportamiento hiperelástico.

Ante esta situación, el modelo que ha demostrado adaptarse mejor al comportamiento del aglomerado es el de Bergström-Boyce (BB en adelante) [8, 12]. Este modelo es capaz de solventar los problemas mencionados anteriormente y reproduce con fiabilidad las grandes deformaciones del material sin ignorar la rigidización que éste experimenta al modificar la velocidad de deformación.

En la figura 2.2, se puede ver una representación esquemática de cómo está configurado el modelo BB [8, 12]. Consta de dos ramas, de las cuáles la primera contiene un elemento hiperelástico no lineal (rama roja) y la segunda está compuesta por un elemento hiperelástico no lineal dispuesto en serie con un elemento viscoelástico no lineal (rama azul).

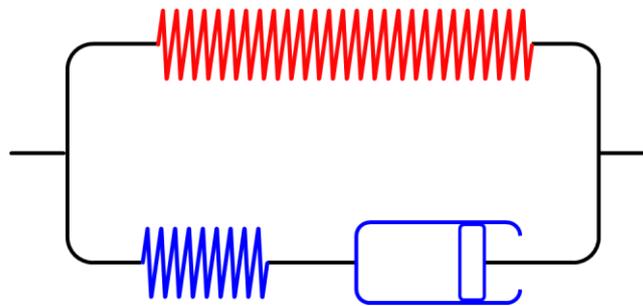


Figura 2.2: Representación esquemática del modelo BB.

Para poder trabajar adecuadamente con el modelo BB, es necesario conocer nueve parámetros característicos, los cuáles se enumeran en la tabla 2.1.

Tabla 2.1: Parámetros característicos del modelo BB en LS Dyna®. [13]

Parámetro	Descripción	Unidad de medida
K	Módulo de compresibilidad volumétrica	N/m ²
G	Módulo elástico de cizalladura	N/m ²
G _v	Módulo viscoelástico de cizalladura	N/m ²
N	Número de segmentos elásticos	-
N _v	Número de segmentos viscoelásticos	-
C	Exponente de deformación	-
M	Exponente de tensión	-
γ ₀	Índice de referencia de deformación	s ⁻¹
τ	Tensión de referencia de Kirchhoff	N/m ²

2.4 Generalidades del MEF.

Como ya se ha indicado, para abordar el cálculo numérico se va a recurrir al MEF, por lo que, en primer lugar, hay que entender cómo funciona.

Básicamente, este método consiste en tomar un dominio continuo y discretizarlo, es decir, dividirlo en un número finito de elementos. Estos elementos son definidos mediante una serie de puntos característicos llamados *nodos*. De este modo, las ecuaciones para resolver el problema se aplican a los nodos y el comportamiento en el interior de cada elemento se obtiene aplicando las llamadas *funciones de interpolación* o *funciones de forma*.

Los elementos en los que se divide la pieza del estudio pueden ser de diversas geometrías, y éstas dependen del programa de cálculo que se utilice. En LS Dyna®, la geometría que se emplea por defecto son los hexaedros, aunque también es posible trabajar con tetraedros o pentaedros, entre otros.

Todos estos elementos pueden clasificarse de diversas maneras, no solo en función de su geometría. De todas las posibles clasificaciones, nos centraremos en tres: según el número de nodos, según la distribución de los nodos y según el tipo de integración.

La clasificación según el número de nodos simplemente hace referencia a la cantidad de nodos necesarios para definir un elemento. Por ejemplo, un elemento hexaédrico de ocho nodos es aquel que posee un nodo en cada uno de sus vértices.

Respecto a la distribución de los nodos, puede haber elementos *lineales* y *cuadráticos*, también denominados estos últimos como *parabólicos*. En el caso de los elementos lineales, únicamente hay nodos situados en las esquinas; en cambio, si son elementos cuadráticos, hay nodos tanto en las esquinas como en el punto medio de las aristas, como se indica en la figura 2.3. Además, los elementos lineales tienen aristas rectas, mientras que los elementos cuadráticos tienen la posibilidad de generar aristas con curva.

Por último, queda la clasificación en función del tipo de integración. Como ya se ha indicado, el MEF ejecuta los cálculos en los nodos, y en el resto del elemento obtiene valores mediante la interpolación a través de las funciones de forma. Estas funciones de forma definen dentro del dominio de un elemento una serie de puntos en los que se aplican dichas interpolaciones. Estos puntos empleados por las funciones de forma son los llamados puntos de integración, y cuantos más haya, mayor será la precisión de las interpolaciones realizadas.

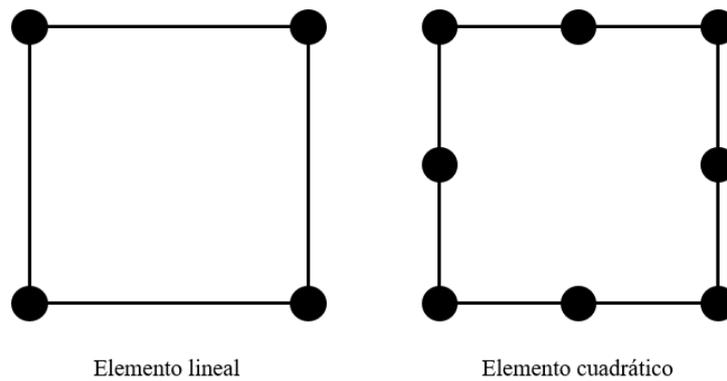


Figura 2.3: Distribución de los nodos en elementos lineales y cuadráticos.

De este modo, se distinguen elementos de integración completa e integración reducida. En el primer caso, se emplean muchos puntos de integración, de modo que logran una mayor precisión y fiabilidad en los resultados obtenidos. Por el contrario, en el segundo caso se emplean muchos menos puntos de integración (de ahí la denominación “reducida”) con el propósito de agilizar los cálculos, aunque no siempre es posible utilizar dichos elementos, ya que, en determinadas situaciones, como se verá a continuación, pueden surgir problemas numéricos.

2.5 Problemas numéricos derivados de la integración reducida.

A la hora de resolver un problema utilizando el MEF, hay que tener cuidado al elegir el tipo de elemento con el que se desea trabajar. Esto es así porque una elección errónea puede provocar un error de cálculo que pase desapercibido y se obtengan resultados espurios. Este es el caso de fenómenos como el bloqueo por cortante, el bloqueo por presión o el *hourglassing*¹, siendo este último el que se ha presentado en los cálculos realizados, razón por la que se le dedica este apartado.

En la figura 2.4 se representa un elemento que está sometido a un esfuerzo de flexión y no tiene problemas de *hourglassing*. Como puede verse, la deformación sufrida es la que se espera de un elemento que soporta una flexión pura.

¹ Se denomina así a este fenómeno porque puede provocar deformaciones en los elementos de modo que éstos se asemejen a un reloj de arena. Dicho término se emplea sin traducción en la literatura.

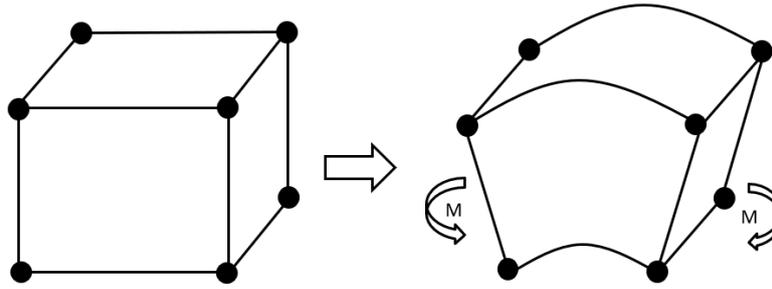


Figura 2.4: Deformación esperada en un elemento sometido a flexión pura.

En cambio, en la figura 2.5 puede verse otro elemento sometido al mismo esfuerzo que el anterior, pero en este caso sí está presente el fenómeno del *hourglassing*. Como consecuencia, la deformación de dicho elemento no es realista. Este error es capaz de propagarse a lo largo de la malla, así que pueden originarse regiones enteras en las que esté presente el *hourglassing*.

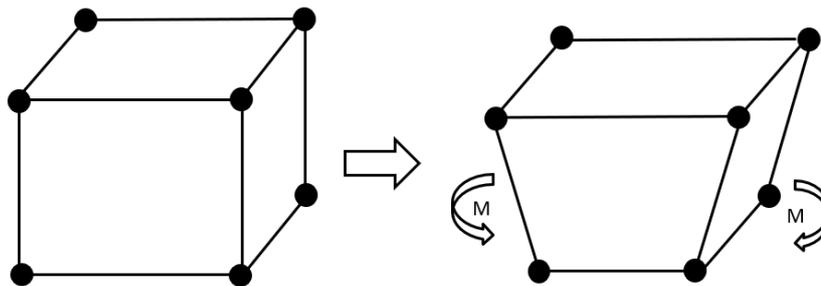


Figura 2.5: Deformación causada por el *hourglassing*.

En casos en los que se generan deformaciones del elemento muy grandes, puede darse el caso que se muestra en la figura 2.6. Esta situación, físicamente es imposible, pero matemáticamente no lo es. Por tanto, aunque se trata de un error, los programas de cálculo no lo consideran como tal y es responsabilidad del ingeniero ser capaz de detectarlo.

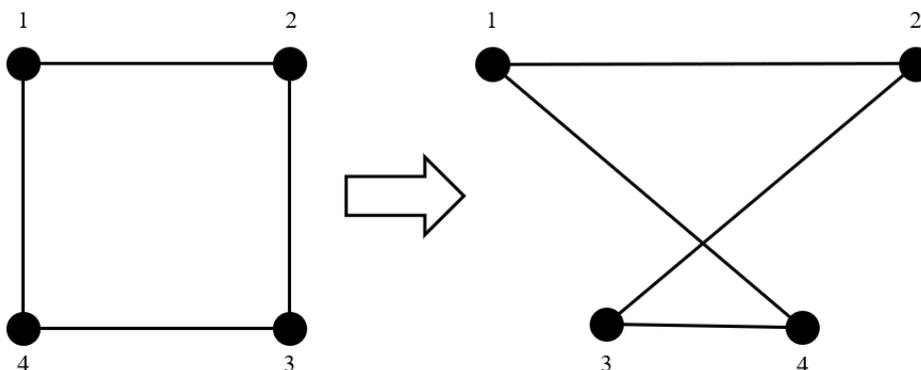


Figura 2.6: Caso extremo de deformación debido al *hourglassing*.

Para evitar este problema, algunos programas de cálculo, entre ellos LS Dyna®, introducen un parámetro de control del *hourglassing*. Además, como este fenómeno está asociado al empleo de elementos de integración reducida (con pocos puntos de integración), con ciertos tipos de formulaciones más elaboradas es más complicado que aparezca este fallo, o incluso con algunas es posible eliminarlo por completo. Naturalmente, las formulaciones más fiables consumen más recursos computacionales, así que es conveniente emplearlas únicamente si hay evidencia de que se están obteniendo malos resultados debido a este fenómeno.

3. ESTUDIO EXPERIMENTAL.

3.1 Campaña de ensayos.

En este trabajo se han realizado un conjunto de ensayos de impacto dinámico, con los objetivos previamente indicados: evaluar los efectos que causa la presencia del aglomerado durante el impacto y desarrollar un modelo numérico capaz de calcular una situación a escala real. Esta clase de ensayos consiste en obtener las fuerzas registradas a lo largo del tiempo tras generar un choque o impacto entre dos elementos:

- Un dardo impactor del que se conoce la masa y la velocidad en el instante del impacto.
- Una viga de acero, con o sin aglomerado en su interior, cuya descripción se puede consultar más adelante.

En la figura 3.1, puede verse una representación esquemática de la configuración de los ensayos ejecutados. La distancia entre los puntos de apoyo, L , es de 900 mm.

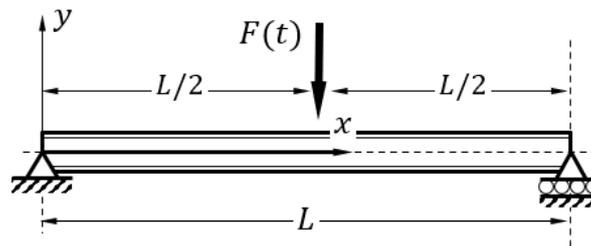


Figura 3.1: Configuración de los ensayos de impacto.

Para cada impacto, se deja caer el dardo desde cierta altura, de modo que éste acelera durante la caída y termina golpeando a la viga a cierta velocidad. Durante este golpe, se produce un intercambio de energía, de modo que la energía cinética adquirida por el impactor en el momento del choque es absorbida por la viga. La expresión que determina la energía cinética adquirida por el dardo es la definida por la ecuación (3.1).

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (3.1)$$

Siendo:

E_c : energía cinética del impactor.

m : masa del impactor.

v : velocidad del impactor.

El valor de la velocidad del impactor viene determinado por la altura desde la que se deja caer éste, tal y como se refleja en la expresión (3.2).

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (3.2)$$

Siendo:

g : aceleración de la gravedad.

h : altura inicial desde donde cae el impactor.

Como puede apreciarse, hay dos maneras de modificar las condiciones del ensayo de acuerdo con las expresiones anteriores: se puede variar tanto la masa como la velocidad. Volviendo a la ecuación (3.1), estos dos términos que pueden cambiar el valor de la energía cinética no lo hacen en la misma medida. El término de la masa es lineal. Por el contrario, el término de la velocidad es cuadrático. Por ende, cualquier modificación en el término de la velocidad va a ser mucho más significativa que una variación de masa.

El objetivo de este trabajo es estudiar el comportamiento de los especímenes de viga en régimen elástico, por lo que las condiciones del ensayo deben ser aquellas que no sobrepasen este límite. Para ello, se ha definido la siguiente campaña de ensayos:

En primer lugar, se han ensayado 6 vigas únicamente conformadas por la chapa de acero.

- Viga nº1: este primer espécimen ha sido de prueba, con el objetivo de establecer la zona de trabajo, y conocer qué perfil adoptan las curvas fuerza-tiempo en esta clase de impactos. Se han realizado tres ensayos a una velocidad de impacto de 2 m/s, y posteriormente se ha ejecutado un cuarto impacto a 4 m/s. En todos los ensayos se ha empleado una masa de 5.3 kg, siendo ésta la suma de la masa del impactor y del carro de sujeción (véase epígrafe 3.2). Se ha empleado un apoyo doble, que más adelante se describe.
- Viga nº2: en este segundo prototipo, se ha cuantificado el efecto del aumento de masa en la energía del impacto. Para ello, se han ejecutado diversos ensayos, todos ellos a 1 m/s, variando la masa de forma creciente en escalones de 0.5 kg. De este modo, con esta viga se han estudiado 18 impactos, con 6 masas distintas: 5.3, 5.8,

6.3, 6.8 y 7.3 kg. Con cada una de las masas se han hecho 3 impactos, de ahí que la cifra final ascienda a 18 ensayos. En este caso, también se ha empleado un apoyo doble.

- Viga nº3: se ha empleado como viga de sacrificio para comprobar ciertos aspectos de la configuración de los especímenes, a raíz de los resultados observados con la viga nº2 (para más detalles, ver epígrafe 3.7). Las condiciones de ensayo han sido: velocidad de impacto de 4 m/s y masa de 5.3 kg, con apoyo doble.
- Vigas nº4, 5 y 6: ensayos con condiciones idénticas a las de la viga nº1, salvo el tipo de apoyo, que en este caso se ha optado por uno simple, que más adelante se describe.

Una vez realizados todos estos ensayos, se ha pasado a trabajar con una viga compuesta por aglomerado de caucho reciclado y acero. Con esta nueva configuración, se han ejecutado los siguientes ensayos:

- Viga nº7: ensayo con condiciones idénticas a las de las vigas nº4, 5 y 6 de la configuración anterior.

En todos los casos, para cada condición se han llevado a cabo tres ensayos para asegurar la repetitividad de los resultados. Además, la frecuencia de adquisición de datos que se ha tomado es de 4000 kHz.

Como puede comprobarse, no hay grandes modificaciones de la velocidad a lo largo de la campaña, ya que después de ensayar la primera viga, se ha observado que ésta presenta abolladura tras un impacto a 4 m/s (figura 3.2), lo que indica que se ha alcanzado la región de comportamiento plástico durante este ensayo. Como ya se ha indicado, para los objetivos establecidos para este trabajo, hay que evitar alcanzar el límite elástico, de modo que se debe trabajar con velocidades por debajo de ese umbral.



Figura 3.2: Estado de la viga nº1 tras el impacto a 4 m/s.

Para finalizar este apartado, se incluye una descripción de los apoyos que se han empleado durante esta campaña de ensayos.

Las vigas se han dispuesto biapoyadas, con el tipo de apoyo que se muestra en la figura 3.3 izquierda. En dicha figura, puede observarse que hay un apoyo tanto en la cara inferior de la viga como en la superior, por lo que este apoyo es denominado *doble* (si se desea conocer más detalles sobre este apoyo y sus mecanismos, véase [6]). Asimismo, este conjunto cuenta con unas bridas de refuerzo, cuya finalidad es lograr una mayor fijación del apoyo superior. Al tomar todas estas medidas, lo que se pretende es anular los desplazamientos transversales de la viga, permitiendo los giros.

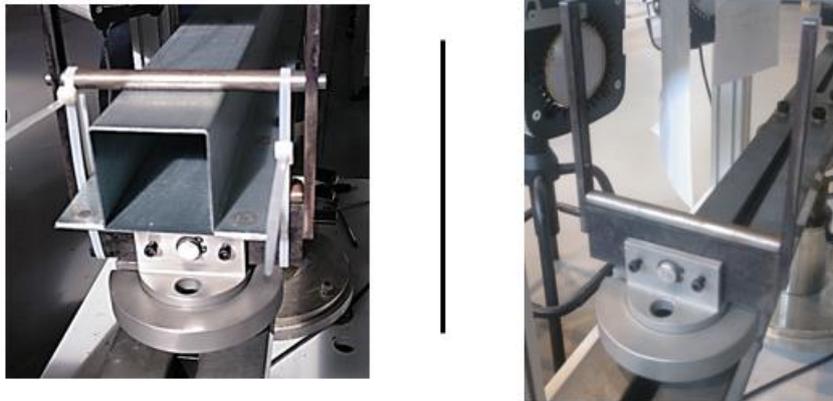


Figura 3.3: Apoyo de la viga doble (izquierda) y simple (derecha).

Por otra parte, en la figura 3.3 derecha, puede verse otra configuración empleada: un apoyo *simple*. Con esta disposición, la viga cuenta únicamente con un apoyo en su cara inferior. Más adelante se detalla por qué se ha tomado esta determinación.

3.2 Cadena de medida.

Para realizar los ensayos, se ha utilizado una máquina de ensayo por caída de dardo *Instron*, modelo *CEAST 9350* (ver figura 3.4), con una célula de carga de 45 kN.

En el apartado anterior, se definió la energía del impacto mediante la ecuación (3.1), en la que se puede modificar tanto la masa (acoplando pesas adicionales al carro) como la velocidad (modificando la altura de caída) para obtener diferentes valores de energía. En el caso de la máquina empleada en los ensayos, a la hora de decidir los parámetros del ensayo, hay que respetar las especificaciones proporcionadas por el fabricante, que se reflejan en la figura 3.5.

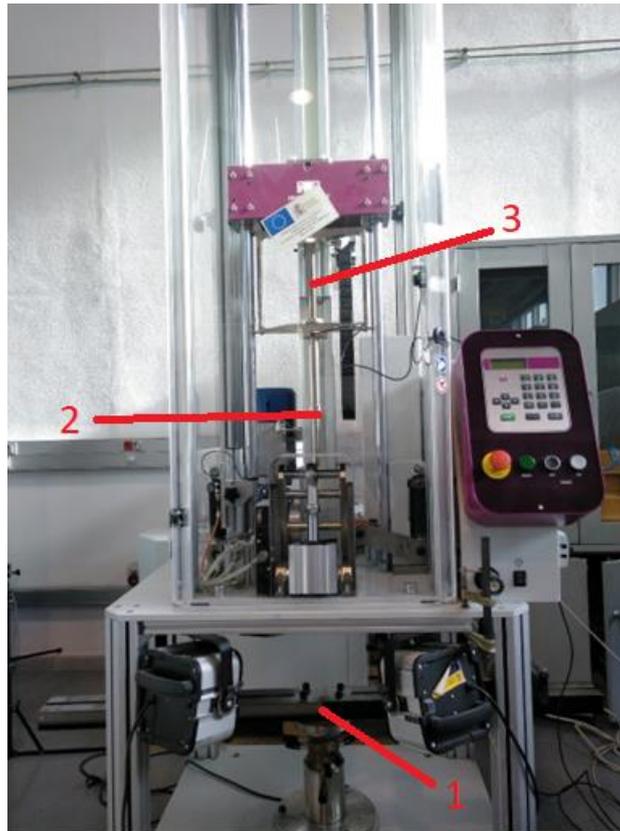


Figura 3.4: Máquina de ensayo modelo CEAST 9350. (1) Soporte de las probetas. (2) Dardo impactor. (3) Carro porta pesas.

En esta figura 3.5, en las ordenadas están representadas las posibles velocidades de impacto, y las curvas indican las masas que pueden ser impactadas durante el ensayo. En el eje de abscisas, figura la energía del impacto que se genera para una masa y una velocidad determinadas.

Nótese que hay una línea discontinua que indica el límite al que llega la máquina. Por ejemplo, con una masa de 10 kg, el mayor impacto que se puede generar es a 14 m/s aproximadamente, y la energía que libera dicho impacto es de 1000 Julios.

Por último, cabe destacar el rectángulo de líneas discontinuas que hay en la esquina inferior izquierda. Esta región, muestra los impactos que pueden realizarse mediante caída libre. Todos aquellos puntos que quedan fuera del rectángulo representan situaciones de impacto en las que la máquina debe recurrir a unos muelles que tiene instalados en su parte superior para generar las condiciones de ensayo deseadas.

El dardo impactor (figura 3.6 izquierda) es el elemento encargado de colisionar contra la viga durante el ensayo. En su interior se aloja un sensor que registra las fuerzas a las que

es sometido este elemento durante el proceso, lo que permite generar una representación de dichas fuerzas del impacto en función del tiempo.

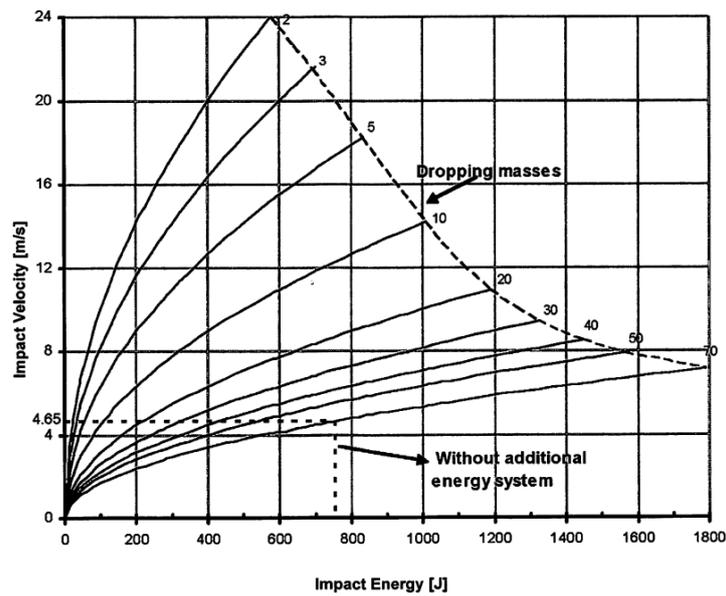


Figura 3.5: Combinaciones de velocidades y masas que es posible ensayar con la máquina del estudio.

[14]

Las características del impactor se recogen en la tabla 3.1.

Tabla 3.1: Características del impactor.

Material	Acero
Diámetro	20 mm
Longitud	340 mm
Masa	1 kg

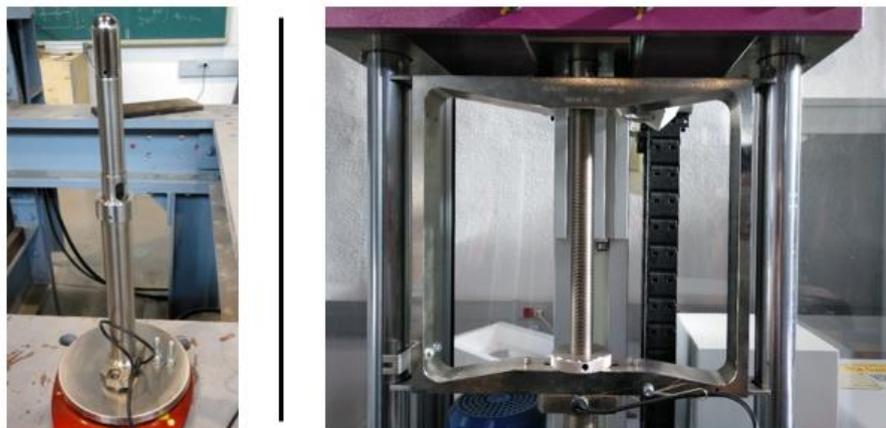


Figura 3.6: Dardo impactor (izquierda) y carro porta pesas (derecha).

Asimismo, cabe destacar que el impactor va sujeto en un carro porta pesas de acero (figura 3.6 derecha) que tiene una masa de 4.3 kg. Este carro de sujeción es el responsable de que se pueda modificar la masa en la ecuación (3.1), ya que permite acoplar pesas adicionales cuando se requiera.

3.3 Geometría de los especímenes.

Las vigas que han sido ensayadas en este estudio han sido fabricadas a partir de chapa de acero galvanizado (ver *Anexo 1. Ficha técnica del acero*), con una longitud de 1 metro. En cuanto a las dimensiones, están recogidas en la figura 3.7. Nótese que no es una viga integral, sino que está formada por dos partes diferentes, que más adelante se detallará cómo han sido unidas. Cabe decir que las aristas no son vivas en ningún caso, sino que tienen un redondeo, propio del proceso de fabricación por el que se ha obtenido la pieza, como puede verse en la figura 3.8.

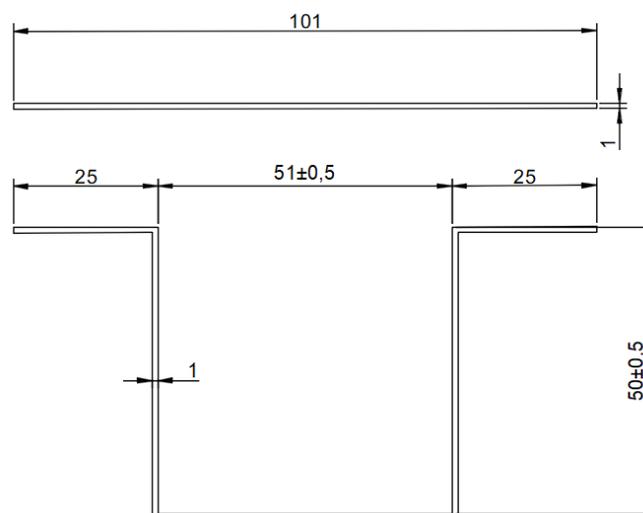


Figura 3.7: Croquis de la sección de la viga (cotas en mm).

En todos los casos, se ha añadido al conjunto un mártir o sufridera de aluminio con forma de paralelepípedo, ubicado en el punto central de la cara superior de la viga, con el objetivo de reforzar la zona del impacto y reducir los efectos en la viga debidos a la concentración puntual de la carga. Su colocación puede apreciarse en la figura 3.8.

En cuanto a sus dimensiones, cuenta con una base de 53 mm × 43 mm y una altura de 12.4 mm.



Figura 3.8: Viga del ensayo de impacto.

Además de los dos elementos ya mencionados, en las vigas compuestas de dos materiales se ha introducido un tercer elemento: aglomerados de pellets de caucho reciclado de NFU y poliuretano con forma de prisma (ver figura 3.9 izquierda), que han sido unidos a la viga de acero mediante la aplicación de una película adhesiva (figura 3.9 derecha), cuyas características se detallan en el apartado 3.5.



Figura 3.9: Aglomerados de caucho reciclado y poliuretano (izquierda) y proceso de unión del aglomerado a la viga (derecha).

Estos aglomerados han sido diseñados para encajar en el interior de la viga, de modo que sus dimensiones coinciden con las de este hueco.

3.4 Materiales empleados.

La viga del ensayo se ha fabricado, como ya se ha adelantado, a partir de una chapa de acero galvanizado (*Anexo 1. Ficha técnica del acero*), que ha sido sometida sucesivamente a un proceso de laminado en frío y plegado para obtener la geometría mostrada en el apartado anterior.

En cuanto a las propiedades de este material, se ha comprobado que la densidad es la característica del acero galvanizado, es decir, 7850 kg/m^3 . Para ello se ha obtenido la masa promedio de todas las vigas ensayadas, siendo ésta de 2.3 kg, y se ha verificado que dicha relación entre la masa y el volumen, obtenido a partir del modelo numérico, se cumple. En lo que al módulo de elasticidad respecta, se han realizado sendos ensayos de tracción y flexión en cuatro puntos para obtenerlo. Más adelante, se explicará la razón de haber recurrido a dos métodos diferentes. Finalmente, se ha adoptado un valor del módulo de Poisson de 0.28 una vez comprobado que, al variar este parámetro entre los valores límite recogidos en la bibliografía (0.28 y 0.3), no se aprecian cambios significativos, por lo que su influencia es irrelevante.

Como ya se ha indicado, en los ensayos interviene también un mártir de aluminio. Sus propiedades son las que se indican a continuación: módulo de elasticidad de 70 GPa, densidad de 2700 kg/m^3 y módulo de Poisson de 0.33. Es preciso indicar que no se ha realizado ningún ensayo para caracterizar este material, de modo que se han considerado las propiedades de un aluminio típico.

El relleno interior está formado por caucho reciclado en forma de pellets obtenido mediante un proceso de vulcanizado, suministrado por la empresa GENAN®. Estos pellets están pegados entre sí mediante poliuretano, de modo que forman un aglomerado cuyas dimensiones y geometría ya se ha indicado en el apartado anterior. Cabe destacar que la masa de los especímenes rellenos de caucho asciende a 3.88 kg. En esos 1.58 kg de diferencia entre ambos tipos de especímenes están incluidas la masa de los pellets de caucho, el poliuretano que une los pellets entre ellos y el adhesivo empleado para pegar los cubos de aglomerado a la viga de acero.

Este caucho ha sido tratado empleando el modelo de Bergström-Boyce, cuyos parámetros característicos se recogen en la tabla 3.2. Además de estos nueve parámetros, también se ha obtenido la densidad de dicho material, siendo ésta 520.91 kg/m^3 . [9]

Tabla 3.2: Parámetros tomados para el modelo BB. [9]

Parámetro	Símbolo	Valor
Módulo de compresibilidad volumétrica [N/m^2]	K	180000
Módulo elástico de cizalladura [N/m^2]	G	65023
Módulo viscoelástico de cizalladura [N/m^2]	G_v	2.03241×10^7
Número de segmentos elásticos	N	1.20812
Número de segmentos viscoelásticos	N_v	29.5752
Exponente de deformación	C	-1.03991
Exponente de tensión	M	1.00001
Índice de referencia de deformación [s^{-1}]	γ_0	0.132048
Tensión de referencia de Kirchhoff [N/m^2]	τ	10813.3

3.5 Proceso de fabricación de los especímenes.

En este apartado, se ha hecho una distinción entre los especímenes de acero o simples, únicamente compuestos de chapa de acero, y los especímenes compuestos, formados por el conjunto chapa de acero y aglomerado de caucho.

3.5.1 Especímenes simples.

Para unir ambas partes de la viga, se ha recurrido a una soldadura por puntos, en la que los puntos de soldadura distan entre sí 100 mm aproximadamente, habiendo un total de 11 puntos de unión en cada ala, uniformemente distribuidos a lo largo de la dimensión longitudinal. Esta disposición se ilustra en la figura 3.10.



Figura 3.10: Disposición de los puntos de soldadura.

La unión se ha llevado a cabo con una máquina de soldadura por puntos modelo *Praxair MPP-30-M* (figura 3.11 izquierda), en la que se han introducido como parámetros de soldadura una intensidad de 10 y un tiempo de 4, siendo estos valores correspondientes a la escala en la que está calibrada la máquina. Es esencial que las condiciones sean aquellas que generen unos puntos lo suficientemente resistentes para que las uniones permanezcan intactas tras los ensayos de impacto. Si esto no ocurre, no se garantizan unos buenos resultados en dicho ensayo, como se verá más adelante. Este proceso se ilustra en la figura 3.11 derecha.

Una vez unidas las dos piezas que componen la viga, solo falta acoplar la sufridera de aluminio, que va pegada a la cara superior de la viga con cinta adhesiva de doble cara.



Figura 3.11: Máquina de soldadura por puntos modelo Praxair MPP-30-M (izquierda) y proceso de soldadura por puntos (derecha).

3.5.2 Especímenes compuestos.

El modo de unir ambas piezas de la viga se ejecuta de forma idéntica al caso anterior. La diferencia en este caso es que previamente a esta operación, hay que unir los aglomerados de pellets de caucho, tanto entre sí como a las caras interiores de la viga. Este proceso de unión es el que se describe a continuación.

Dicha unión de los cubos de aglomerado se ha realizado mediante un sistema resínico epoxi formado por una resina epoxi *SR 8100* y un endurecedor *SD 8822*, ambos suministrados por el fabricante *Sicomín*. La proporción de estos componentes en la mezcla ha sido 35.5 g de endurecedor y 114.5 g de resina.

Para aplicar dicha mezcla y lograr el pegado deseado, se han seguido las recomendaciones del fabricante en lo referente a tiempo de secado a temperatura ambiente, además de un postcurado a 40 °C.

Una vez transcurrido este tiempo de pegado, sólo resta ejecutar las soldaduras por puntos, controlando que el incremento de temperatura de la viga no sea excesivo para tratar que la afectación del aglomerado y el adhesivo sea mínima.

3.6 Ensayos estáticos de caracterización.

3.6.1 Ensayo de tracción.

Este ensayo se ha ejecutado con el objetivo de hallar tanto el módulo de elasticidad del acero de la viga, como su límite elástico. Para ello, se han sometido a tracción una serie de probetas, obtenidas mediante laminado en frío y corte por chorro de agua, con las dimensiones que se muestran en la figura 3.12.

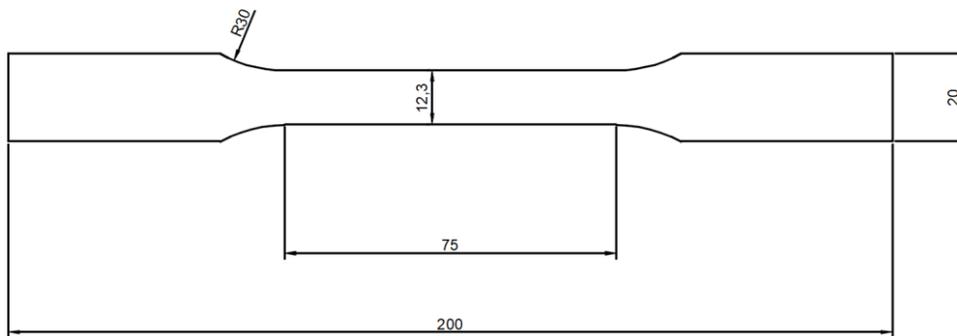


Figura 3.12: Geometría de las probetas del ensayo de tracción (cotas en mm).

Dichas probetas cuentan con un espesor de 1 milímetro, y están dimensionadas conforme a la norma UNE-EN ISO 6892-1 [16].

En este ensayo intervienen dos tipos de probetas: la mitad tienen orientado su eje longitudinal con la dirección de laminado (marcadas con la letra “L”), y la otra mitad tienen su eje longitudinal orientado según la perpendicular a la dirección de laminado, es decir, la dirección transversal (marcadas con la letra “T”). Hay un total de 12 ensayos: 6 probetas longitudinales (L) y 6 transversales (T).

Esta distinción entre dirección longitudinal y transversal se lleva a cabo para comprobar la influencia de la dirección de laminación en las propiedades del material.

Previamente a la realización de los ensayos, se ha obtenido la sección de la zona de trabajo de cada probeta. Para ello, se ha medido la zona central de todos los especímenes, ya que puede haber variaciones en sus dimensiones, debido a factores como el propio proceso de fabricación. Los resultados de estas mediciones se recogen en las tablas 3.3 y 3.4.

Tabla 3.3: Dimensiones obtenidas para probetas transversales.

PROBETAS TRANSVERSALES (T)									
Probeta	Ancho [mm]			Espesor [mm]			Ancho medio [mm]	Espesor medio [mm]	Área [mm ²]
T01	12.30	12.31	12.30	1.01	1.00	1.01	12.30 ± 0.01	1.01 ± 0.01	12.39
T02	12.32	12.32	12.30	1.01	1.01	1.01	12.31 ± 0.01	1.01 ± 0.00	12.44
T03	12.32	12.30	12.33	1.01	1.02	1.02	12.32 ± 0.02	1.02 ± 0.01	12.52
T04	12.28	12.29	12.28	1.02	1.03	1.02	12.28 ± 0.01	1.02 ± 0.01	12.57
T05	12.31	12.30	12.30	1.01	1.02	1.03	12.30 ± 0.01	1.02 ± 0.01	12.55
T06	12.30	12.32	12.34	1.01	1.01	1.01	12.32 ± 0.02	1.01 ± 0.00	12.44

Tabla 3.4: Dimensiones obtenidas para probetas longitudinales.

PROBETAS LONGITUDINALES (L)									
Probeta	Ancho [mm]			Espesor [mm]			Ancho medio [mm]	Espesor medio [mm]	Área [mm ²]
L01	12.30	12.32	12.30	1.02	1.02	1.03	12.31 ± 0.01	1.02 ± 0.01	12.59
L02	12.31	12.31	12.28	1.02	1.03	1.02	12.30 ± 0.02	1.02 ± 0.01	12.59
L03	12.30	12.31	12.31	1.02	1.02	1.03	12.31 ± 0.01	1.02 ± 0.01	12.59
L04	12.30	12.31	12.30	1.02	1.02	1.02	12.30 ± 0.01	1.02 ± 0.00	12.55
L05	12.30	12.30	12.29	1.04	1.02	1.03	12.30 ± 0.01	1.03 ± 0.01	12.67
L06	12.30	12.29	12.34	1.03	1.03	1.03	12.31 ± 0.03	1.03 ± 0.00	12.68

En los ensayos de tracción, han intervenido dos dispositivos, que se describen a continuación. Dichos ensayos se han ejecutado bajo condiciones de velocidad constante a 1 mm/min².

En primer lugar, una máquina de ensayos universal, modelo *Servosis ME405/10* con célula de carga de 10 kN. Esta máquina es la encargada de registrar las fuerzas a las que es sometida la probeta, así como los desplazamientos. No obstante, se ha optado por utilizar un segundo dispositivo para registrar estos últimos, para evitar incluir en los cálculos los propios desplazamientos de la máquina (que incluyen deslizamientos no deseados entre garras y probetas).

En segundo lugar, un extensómetro de pinza, modelo *Epsilon 3542-050M-050-ST* con separación inicial de 50 mm y rango del 50%. Su disposición puede verse en la figura 3.13. Este dispositivo registra las elongaciones que sufre la parte calibrada de la probeta entre las patas del extensómetro durante el ensayo.

² Aunque esta unidad no pertenece al SI, se ha incluido en este trabajo, ya que por comodidad su uso está aceptado en el entorno experimental.

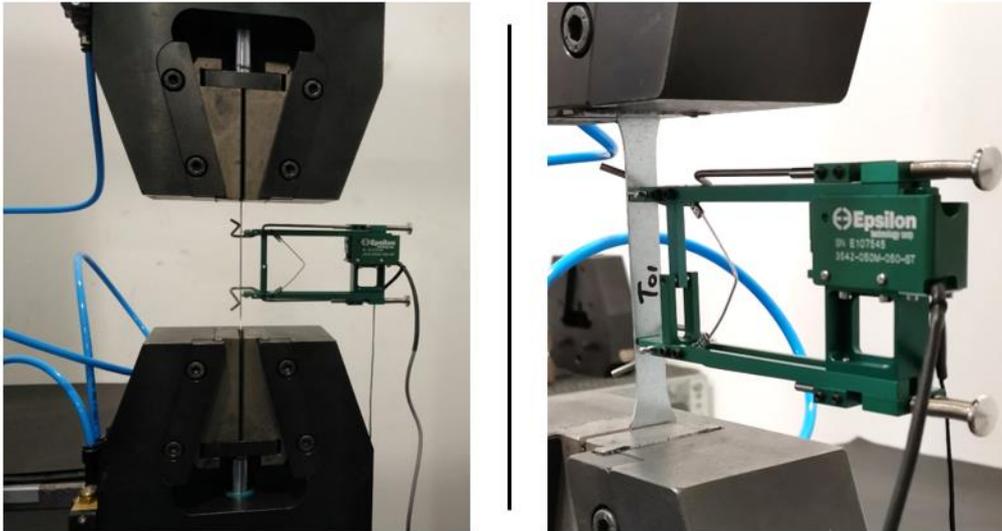


Figura 3.13: Disposición de la probeta y los dispositivos de medida en los momentos previos al ensayo.

Con estos dos aparatos, al final de cada ensayo se han obtenido una serie de valores de fuerza y longitud. Estos valores pueden transformarse fácilmente en tensiones y deformaciones, empleando las ecuaciones (3.3) y (3.4).

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{F}{b \cdot e} \quad (3.3)$$

Siendo:

σ : tensión.

F : fuerza aplicada.

b : ancho medio de la probeta.

e : espesor medio de la probeta.

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (3.4)$$

Siendo:

ε : deformación unitaria.

$l - l_0$: variación de longitud medida por el extensómetro.

l_0 : longitud inicial. En este caso, tiene un valor de 50 mm.

A partir de los valores de tensión y deformación, se pueden obtener las curvas tensión-deformación ($\sigma - \varepsilon$) que caracterizan al acero galvanizado de las probetas. Las curvas tensión-deformación hasta la rotura pueden consultarse en el *Anexo 2. Ensayos de tracción*.

Observando dichas gráficas, se ha determinado que el cambio de pendiente, y por tanto el comienzo de la zona plástica, se encuentra en el entorno de 300 MPa. De este modo, se ha aceptado que el límite de fluencia del acero adopta ese valor, y la zona elástica comprende desde 0 a 300 MPa. En las figuras 3.14 y 3.15, aparecen representadas las curvas de deformación elástica para las probetas transversales y longitudinales.

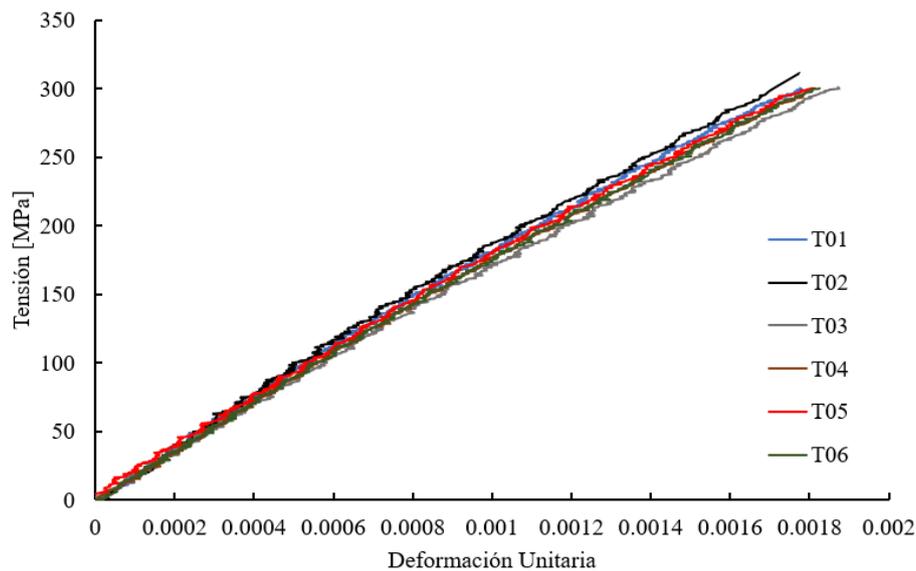


Figura 3.14: Curvas de tensión-deformación elástica de los ensayos con probetas transversales.

Como puede observarse, se ha obtenido una gran repetitividad, tanto en los ensayos de las probetas transversales como en las longitudinales.

Cada una de las curvas obtenidas se ha ajustado a una recta mediante una regresión lineal, de modo que la pendiente de cada recta es el módulo de elasticidad (E) de su correspondiente probeta. En la tabla 3.5, figuran los resultados obtenidos de este ajuste.

Una vez obtenidos estos valores, sólo falta obtener el valor medio en cada caso, acompañado de su desviación típica. Como ya se ha dicho antes, se ha logrado una gran proximidad entre los resultados de los distintos ensayos, tanto transversales como longitudinales. Por tanto, es de esperar que la dispersión sea pequeña en ambos casos.

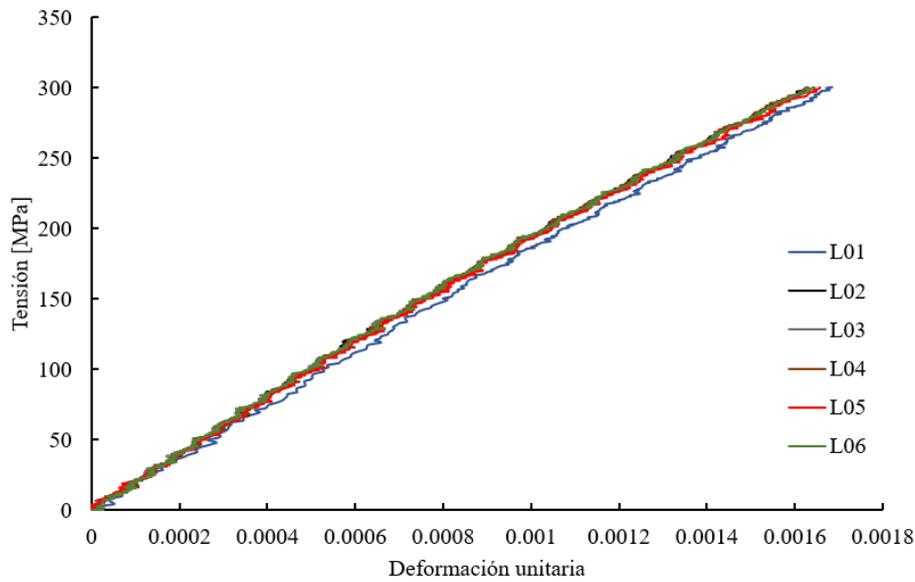


Figura 3.15: Curvas de tensión-deformación elástica de los ensayos con probetas longitudinales.

Tabla 3.5: Módulos de elasticidad obtenidos en los ensayos de tracción.

Probeta	E [GPa]	Probeta	E [GPa]
T01	173.55	L01	179.46
T02	177.47	L02	185.96
T03	162.80	L03	184.99
T04	168.75	L04	186.81
T05	168.00	L05	183.66
T06	168.31	L06	185.90

Los resultados obtenidos son los expresados en (3.5) y (3.6).

$$E_{long} = 184.46 \pm 2.67 \text{ GPa} \quad (3.5)$$

$$E_{transv} = 169.81 \pm 5.07 \text{ GPa} \quad (3.6)$$

Nótese que el módulo de elasticidad de las probetas longitudinales y transversales son ligeramente diferentes, aunque son bastante próximos. De todos modos, se ha elegido como módulo de elasticidad el resultado obtenido de los ensayos con probetas longitudinales, ya que la dirección principal de la viga coincide con la orientación del laminado de las probetas longitudinales.

3.6.2 Ensayo de flexión en cuatro puntos.

Como se verá más adelante, al considerar para el modelo numérico el módulo de elasticidad determinado con los ensayos de tracción, los resultados obtenidos no se correlacionan bien con los resultados experimentales. Una hipótesis que justifica dicha discrepancia es que la rigidez de la viga como conjunto no sea la misma que la determinada para el acero a través de los ensayos de tracción, presentando por tanto un valor inferior.

Con esta hipótesis, se ha tomado la decisión de realizar un ensayo de flexión en cuatro puntos con el objetivo de determinar lo que puede denominarse *módulo de elasticidad efectivo* ($E_{efectivo}$). Este módulo, representa la rigidez de la viga como conjunto, y es aquel que debe considerarse para que los resultados numéricos y experimentales coincidan.

Un ensayo de flexión en cuatro puntos consiste en someter a la viga a un esfuerzo de flexión pura en su zona central, aplicando dos cargas simétricas tal y como se muestra en la figura 3.16.

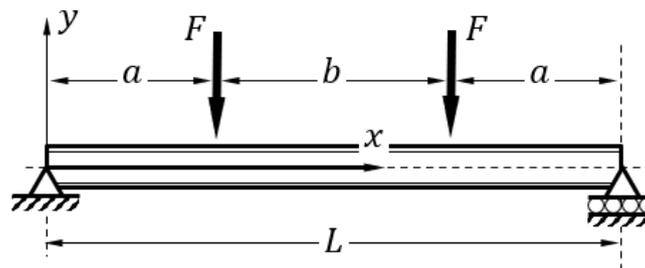


Figura 3.16: Configuración del ensayo de flexión en cuatro puntos.

Con este tipo de configuración, se sabe que la flecha en el tramo comprendido entre las dos cargas, sometido a flexión pura, se obtiene, para el sistema de referencia representado en la figura 3.16, a partir de la expresión (3.7).

$$y = \frac{F \cdot a}{6 \cdot E \cdot I} (3Lx - 3x^2 - a^2) \quad (3.7)$$

Siendo:

F : fuerza en cada uno de los dos puntos de aplicación.

E : módulo de elasticidad.

I : inercia de la sección de la viga. En este caso, vale 134230 mm^4 .

a, L : dimensiones indicadas en la figura 3.16. Poseen un valor de 300 y 900 mm, respectivamente.

El ensayo se ha llevado a cabo con la misma máquina y célula de carga que el ensayo de tracción, en la que se ha dispuesto la viga tal y como se muestra en la figura 3.17. Se han efectuado tres ciclos de carga y descarga, a una velocidad de carga constante de 1 mm/min, alcanzando una carga máxima de 2000 N. Los radios de los apoyos, así como los puntos de aplicación de las cargas, son de 10 mm.

Los desplazamientos de los puntos de interés de la viga se han registrado con palpadores modelo *Keyence GT2 – P12K*, con un rango de 12 mm y una resolución de $0.1 \mu\text{m}$. Estos dispositivos se han situado en las posiciones que se indican en la figura 3.17.

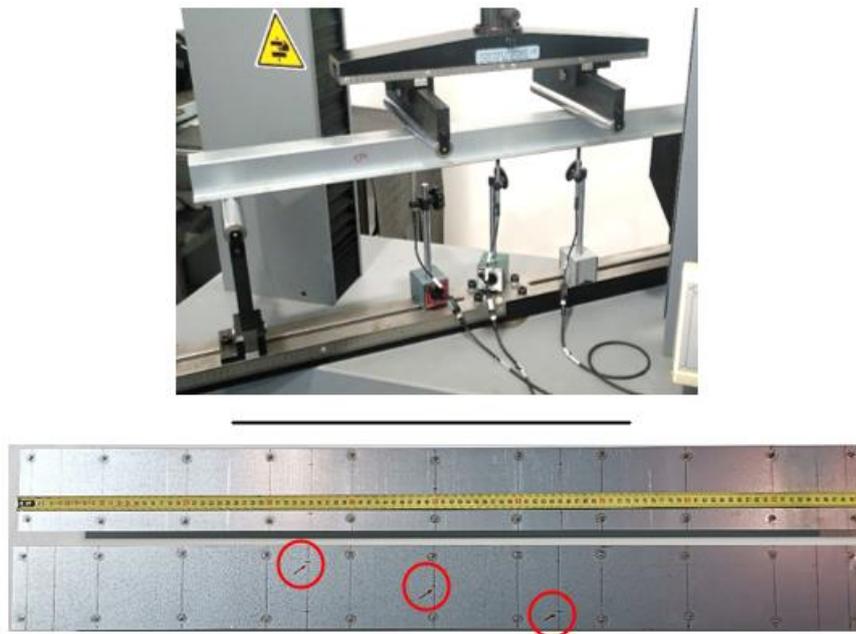


Figura 3.17: Disposición de los aparatos de medida durante el ensayo de flexión en cuatro puntos.

Con los datos de carga proporcionados por la máquina de ensayo y los datos de desplazamientos medidos por el palpador, se han obtenido curvas que relacionan fuerza y desplazamiento, como la que se muestra en la figura 3.18. Se han ensayado un total de 3 vigas, con el objetivo de verificar que hay repetitividad.

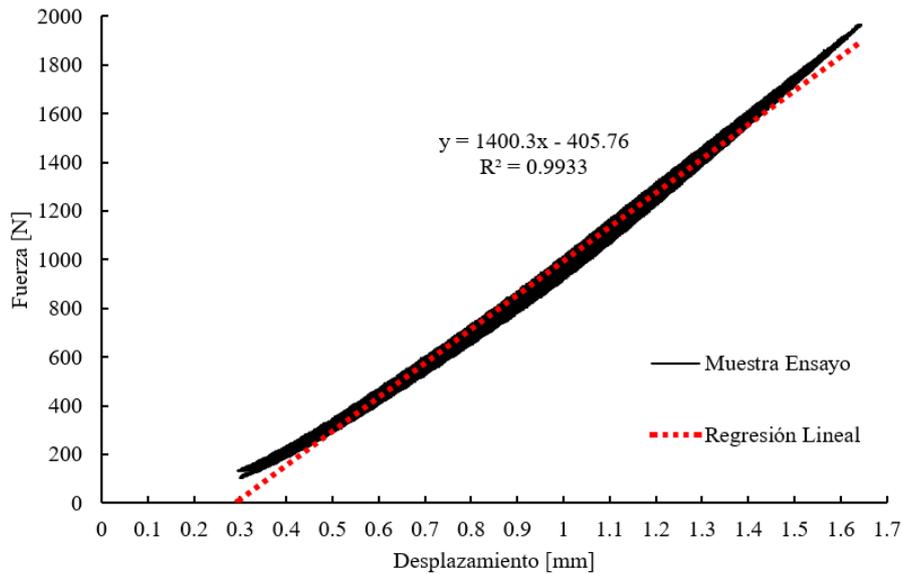


Figura 3.18: Ajuste lineal de la curva fuerza-desplazamiento.

Una vez representadas dichas curvas, se ha realizado una regresión lineal, de modo que se ha obtenido para cada caso una pendiente K . Dicha pendiente, muestra la relación entre la fuerza y el desplazamiento provocado, expresada por la ecuación (3.8).

$$K = \frac{P}{y} \quad (3.8)$$

Siendo:

y : flecha de la viga.

P : carga aplicada por la máquina sobre la viga. Retomando la expresión (3.7), tenemos que $F = P/2$.

Si se desea evaluar los datos registrados por el palpador central, hay que emplear la expresión (3.9), correspondiente a la flecha en el punto central de la viga.

$$y = \frac{F \cdot a}{24 \cdot E \cdot I} (3L^2 - 4a^2) \quad (3.9)$$

Analizando la ecuación (3.9), se puede obtener una expresión como (3.10), en la que el módulo de elasticidad queda definido en función de unos parámetros geométricos y las relaciones fuerza-desplazamiento K , todos ellos datos conocidos. De este modo, para obtener el valor de $E_{efectivo}$, basta con sustituir en dicha expresión. Como ya se ha

indicado antes, el hecho de llamar *efectivo* a este módulo obtenido es debido a que realmente este valor no corresponde al módulo de elasticidad del acero empleado.

$$E = \frac{K \cdot a}{24 \cdot I} (3L^2 - 4a^2) \quad (3.10)$$

Los dos palpadores situados bajo las cargas se han colocado con el propósito de minimizar los desplazamientos espurios que pueden aparecer debido a la deformación previa de la viga, como consecuencia del proceso de fabricación, es decir, el plegado y la soldadura.

Esta es la razón de que, como puede observarse en la figura 3.17, ambos palpadores se sitúan con una excentricidad respecto al eje longitudinal. Con esta distribución, estos dos palpadores registran un desplazamiento con dos componentes: una debida a la flexión y otra debida a esas deformaciones previas, esta última con signo contrario en cada uno de los palpadores. Posteriormente, al trabajar con un desplazamiento promediado en estos dos dispositivos, se logra compensar este efecto no deseado, de modo que sólo se tiene en cuenta el efecto de la flexión.

Estos dos palpadores no se encuentran en la sección central de la viga, por lo que la expresión de la flecha registrada es distinta, siendo ésta la indicada en la expresión (3.11).

$$y = \frac{F \cdot a}{6 \cdot E \cdot I} (3aL - 4a^2) \quad (3.11)$$

No obstante, el procedimiento a seguir es idéntico: obtener K a partir de las gráficas fuerza-desplazamiento promediado y despejar E , dando lugar a la ecuación (3.12).

$$E = \frac{K \cdot a}{6 \cdot I} (3aL - 4a^2) \quad (3.12)$$

Todos los registros de fuerza-desplazamiento, tanto del palpador central como de los palpadores situados bajo carga promediados, se pueden consultar en el *Anexo 3. Ensayos de flexión en cuatro puntos*.

En la tabla 3.6, se recogen los resultados obtenidos del procedimiento anteriormente descrito. Por último, cabe añadir que las pendientes de las rectas se han obtenido considerando los desplazamientos a partir de 0.3 mm, descartando los valores iniciales en los que los palpadores se estaban asentando.

Tabla 3.6: Resultados del ensayo de flexión en cuatro puntos.

Viga	Sección	K [N/mm]	E [GPa]
Nº 04	Central	1282	123.56
	Bajo carga	1400	117.34
Nº 05	Central	1201	115.76
	Bajo carga	1327	111.22
Nº 06	Central	1200	115.66
	Bajo carga	1326	111.13

Con estos resultados, se ha obtenido un valor medio, $E_{efectivo}$, que aparece en la ecuación (3.13). Para llevar a cabo esta operación, se ha eliminado el valor de la viga nº6 bajo carga, 111.13 GPa, por ser el más disperso, y se ha calculado la media con los 5 valores restantes.

$$E_{efectivo} = 116.7 \pm 4.46 \text{ GPa} \quad (3.13)$$

Este resultado demuestra que la hipótesis que se planteaba al principio de este apartado, respecto a que la rigidez de la viga es inferior a la teórica obtenida en el ensayo de tracción, es cierta. En consecuencia, el módulo de elasticidad que debe emplearse para modelar numéricamente los impactos toma el valor de 117 GPa.

3.7 Resultados experimentales de los ensayos de impacto.

En este apartado, se van a analizar los resultados obtenidos de los ensayos de impacto realizados. Como se ha logrado una gran repetitividad en dichos ensayos, únicamente se mostrarán los resultados necesarios para ilustrar las conclusiones obtenidas, entendiendo que el resto comparten las mismas características. Si se desea consultar todos los resultados obtenidos de la campaña, éstos se recogen en el *Anexo 4. Ensayos dinámicos*.

En la figura 3.19, se muestran los resultados de tres ensayos ejecutados en las mismas condiciones, que son: masa de impacto de 5.3 kg y velocidad de impacto de 2 m/s. Estos ensayos corresponden a tres vigas diferentes, lo que ilustra lo afirmado en el párrafo anterior sobre la repetitividad de los ensayos.

Lo primero que salta a la vista es el perfil que tienen las curvas, formado por tres picos, lo que refleja que durante todo el fenómeno estudiado se producen tres contactos entre el dardo y la viga. En cuanto a la duración, el impacto dura aproximadamente 6 ms. Por

último, cabe destacar que los dos primeros picos alcanzan su máximo en torno al mismo valor, alrededor de 5000 N, aunque si cabe, el segundo pico es incluso un poco más alto. El tercer pico es el que se aleja de esta tendencia, ya que su máximo no supera los 4500 N.

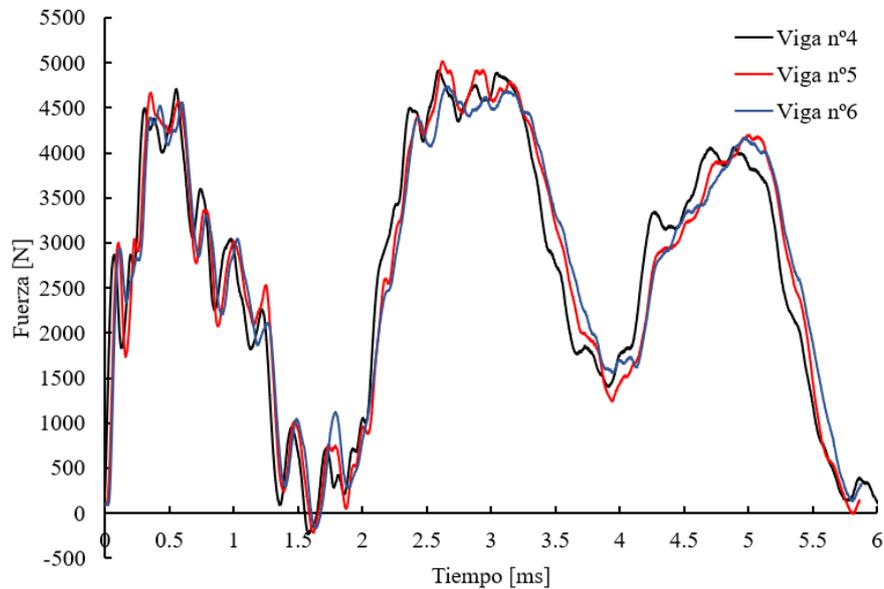


Figura 3.19: Resultados experimentales obtenidos con las vigas nº4, 5 y 6 con una velocidad de impacto de 2 m/s y una masa de 5.3 kg.

Véase que la tendencia de las gráficas muestra que el segundo impacto es el más intenso de los tres, algo inesperado, pues es más natural pensar que el primer contacto entre ambos elementos debe ser el más intenso de todos. Por el contrario, los resultados muestran una realidad muy diferente.

Prosiguiendo con este apartado, merece la pena analizar la viga nº2 (figura 3.20), que se ha ensayado, como ya se indicó previamente, aumentando gradualmente la masa, aplicando incrementos de 0.5 kg, desde 5.3 kg a 7.3 kg, a una velocidad de impacto constante de 1 m/s.

En la figura 3.20, se observa que la modificación de la masa sólo afecta a la intensidad del registro, permaneciendo la duración del fenómeno y la forma de las curvas sin cambios significativos. En cuanto al incremento de intensidad, puede apreciarse que los resultados de un ensayo con el inmediatamente superior apenas cambian, y sólo se detecta un aumento en las fuerzas al comparar dos ensayos no consecutivos, de modo que el mayor aumento registrado se da entre los dos extremos, es decir, entre 5.3 kg y 7.3 kg, incrementándose la fuerza máxima de 2500 N a 3300 N, aproximadamente.

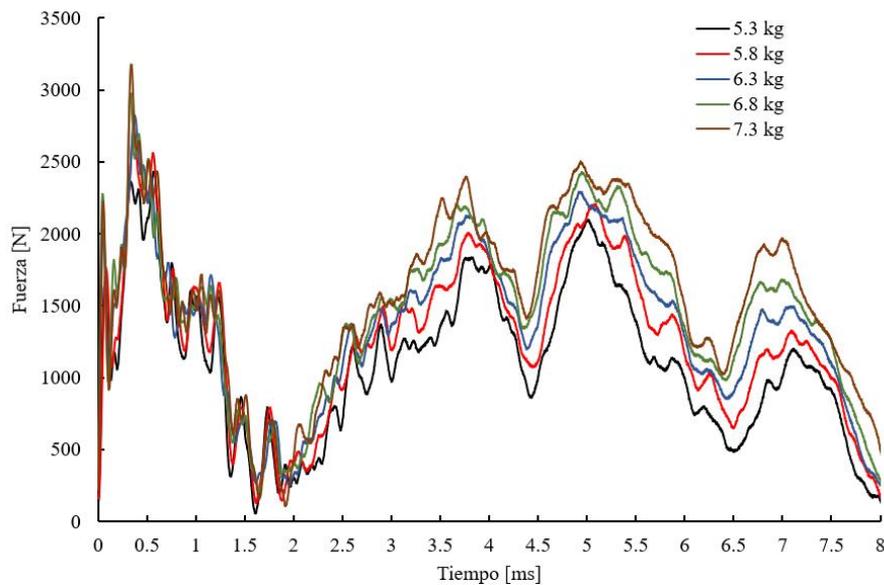


Figura 3.20: Resultados experimentales obtenidos con la viga nº 2, con una velocidad de impacto de 1 m/s y una masa creciente en incrementos de 0.5 kg de 5.3 kg a 7.3 kg.

Tras ejecutar todos los impactos con la viga nº2, se observó que parte de los puntos de soldadura de la viga se habían separado, como queda reflejado en la figura 3.21, en la que se muestra cómo un ala de la viga pudo ser separada manualmente tras ser dicha viga ensayada.



Figura 3.21: Estado de las soldaduras de la viga nº2 tras los ensayos de impacto.

Sin embargo, la repetitividad de los ensayos (véanse figuras A.21 a A.25 en el *Anexo 4. Ensayos dinámicos*), no hacen suponer que el daño haya sido progresivo, ya que, en este supuesto, la repetitividad se hubiese visto afectada. Así pues, cabe considerar que el daño fue producido inicialmente y, en consecuencia, los resultados son aceptables para comprobar sobre un mismo espécimen (con menos soldaduras) la influencia de la masa.

No obstante, esta última observación pone de manifiesto que es fundamental que los puntos de soldadura no se separen tras los ensayos de impacto, para poder garantizar unos resultados experimentales aptos para llevar a cabo una correlación numérico-experimental. Observando las figuras 3.19, en la que los puntos de soldadura no se separan, y 3.20, en la que sí se produce esta separación, esta variable produce unos cambios muy considerables en los perfiles de las curvas.

Esta última conclusión motivó la realización del ensayo con la viga nº3 para determinar los parámetros óptimos de soldadura, y así lograr que estas uniones no se separasen tras los impactos. Como estos ensayos se realizaron en unas condiciones fuera del alcance de este trabajo, ya que se alcanzó la zona de plastificación de la viga, no se han incluido en el documento los correspondientes resultados. Una vez hallados estos parámetros óptimos, se han utilizado en vigas posteriores (es decir, de la viga nº4 en adelante).

4. ESTUDIO NUMÉRICO.

4.1 Introducción.

Como ya se ha explicado en capítulos anteriores, en este trabajo se está abordando un fenómeno de impacto, empleando para su resolución el MEF.

Las dos posibilidades que se presentan para resolver este problema son aplicar dinámica implícita o explícita. La diferencia entre estos dos métodos radica en la forma en que se resuelven las ecuaciones.

En dinámica implícita, al emplear una formulación más robusta, cualquier paso de tiempo es válido, siendo posible escoger pasos de tiempo mayores para estudiar fenómenos de larga duración o lentos, sin dar lugar a inestabilidades numéricas. No obstante, esta formulación también es más pesada en términos computacionales, por lo que ralentiza los procesos de cálculo.

Por otra parte, en dinámica explícita, se emplea una formulación menos pesada desde un punto de vista computacional, y, por ende, más rápida. Sin embargo, en este caso, para evitar los problemas de inestabilidades numéricas, el paso de tiempo debe ser menor que el tiempo que tarda una onda en atravesar el elemento más pequeño del modelo. Este límite viene determinado por la relación de Courant, que está definida por la ecuación (4.1) [11].

$$\Delta t \leq \frac{h}{c} \quad (4.1)$$

Siendo:

h : tamaño mínimo de los elementos.

c : velocidad máxima de propagación de las ondas.

El cumplimiento de esta relación da lugar a pasos de tiempo muy pequeños, por lo que, en general, los pasos de tiempo empleados para resolver casos de dinámica implícita son de 10 a 100 veces mayores que los utilizados en dinámica explícita [10].

Además, de la expresión (4.1) se deduce que el paso de tiempo está condicionado por la velocidad del fenómeno que se está estudiando.

En la figura 4.1, puede observarse para qué situaciones se emplea un método u otro según la velocidad. En dicha figura se puede ver que la dinámica implícita es empleada en problemas estáticos o cuasi estáticos, mientras que la dinámica explícita adquiere importancia en los problemas dinámicos de elevada velocidad.

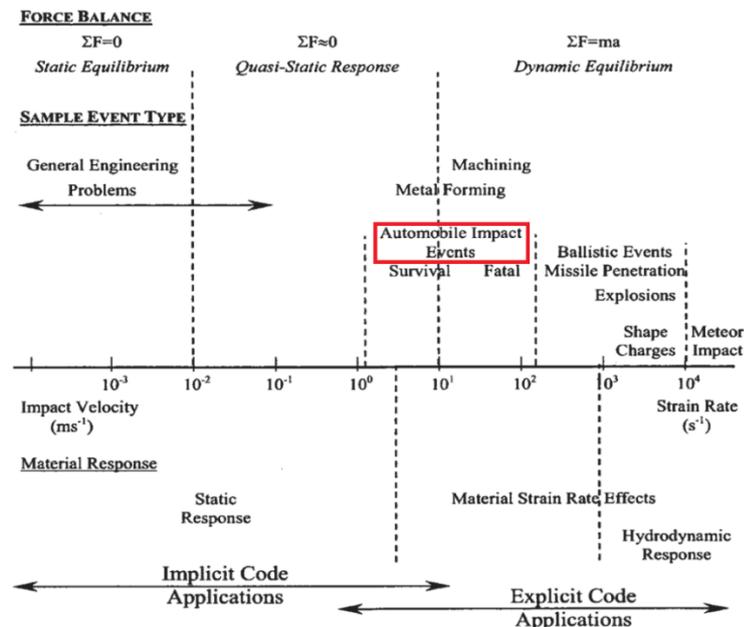


Figura 4.1: Resumen de las aplicaciones del método explícito e implícito. [10]

Se puede observar, asimismo, que para los fenómenos de impacto (remarcados en la figura 4.1), es posible emplear tanto un método como otro. En los casos tratados en este trabajo, se va a optar por emplear dinámica explícita por varios motivos.

El primer motivo, es la mayor eficiencia computacional que presenta este método, pues la dinámica implícita, como ya se ha indicado, tarda más tiempo en calcular, y además es susceptible de presentar problemas de convergencia debido a la aparición de no linealidades, algo típico en problemas de la índole que se está estudiando.

Otra razón es que, si bien en un impacto como los que se están estudiando se puede trabajar con ambos métodos, esto no es así en problemas de impacto a mayor escala, donde las velocidades y las no linealidades son mayores, eliminando así la posibilidad de optar por la dinámica implícita. No hay que perder de vista que el objetivo de este trabajo es obtener un modelo que permita reproducir impactos a escala real, por lo que es más lógico emplear la dinámica explícita desde el principio.

En el área de conocimiento en la que se desarrolla este trabajo, los programas de los que se dispone, con suficiente experiencia, para la resolución de problemas de dinámica explícita son LS Dyna® y Ansys®. No obstante, como ya se ha introducido en el epígrafe anterior, el aglomerado de caucho ha sido caracterizado usando el modelo BB [9], el cual solo está disponible en LS Dyna®, razón por la que finalmente éste ha sido el programa seleccionado.

Si bien como software de cálculo se va a emplear LS Dyna®, este programa dispone de herramientas limitadas para modelar la geometría y el mallado de las piezas. En cambio, Ansys® ofrece un mayor abanico de opciones para efectuar esta labor. Para una geometría más simple, habría sido posible emplear únicamente LS Dyna®, pero dado que el espécimen que se va a simular tiene cierta complejidad, es mucho más cómodo modelar y mallar en ANSYS® y posteriormente exportar tanto la geometría como la malla para trabajar con LS Dyna®.

Una característica muy útil de LS Dyna®, es que el software está programado para que siempre se cumpla la relación de Courant (4.1), de modo que, a lo largo de la simulación, el paso de tiempo sufre modificaciones para adaptarse a las deformaciones que sufren los elementos que componen el dominio. Más adelante, se verá cómo esta función facilita la puesta a punto del modelo.

4.2 Puesta a punto del modelo.

En este apartado, se describen todas las decisiones referentes a la configuración del modelo numérico.

4.2.1 Condiciones de contorno.

Gracias a las características de nuestro modelo, es posible realizar una simplificación, pues la viga presenta simetría respecto a dos planos: uno transversal y otro longitudinal, que confluyen en el centro de gravedad de la pieza. Aprovechando esta situación, el modelo se puede reducir a una cuarta parte de la viga. Esta decisión implica una agilización sensible del proceso de computación, ya que la cantidad de elementos que deben considerarse para los cálculos se reducen notablemente. Eso sí, es necesario

imponer condiciones de simetría en los dos planos que seccionan la pieza, los cuáles se indican en la figura 4.2.

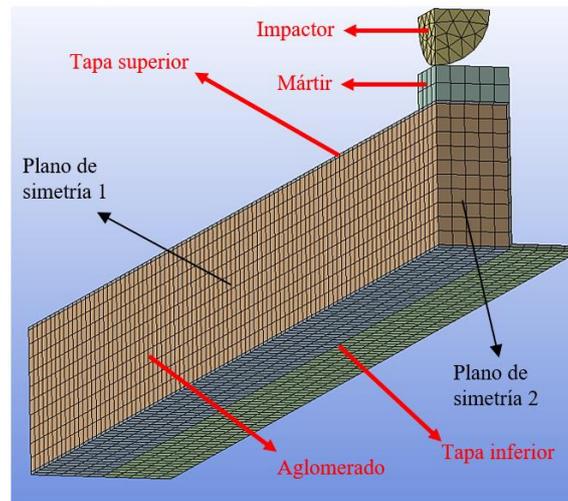


Figura 4.2: Elementos que componen el modelo y definición de los planos de simetría.

Otra decisión adoptada ha sido ejecutar el mallado de manera que las mallas del aglomerado y la viga coincidan, para poder pegarlos cómodamente uniendo nodos comunes. Esta decisión se ha extendido al resto de la viga.

Un parámetro muy importante es la velocidad inicial del impactor. Al tratarse de un ensayo de caída libre, la velocidad inicial es nula. No obstante, para ahorrar tiempo de computación, en lugar de calcular la caída libre por completo, sólo se simula el instante justo en el que el impactor y la viga entran en contacto. Por tanto, la velocidad inicial ya no vale cero, sino que su valor se puede obtener, en función de la altura de caída, mediante la expresión (3.2).

Seguidamente, hay que definir los contactos entre elementos. Esta operación se ha ejecutado imponiendo contactos automáticos entre todas las superficies.

Además, también es necesario definir los apoyos que sostienen la viga. Sus características se detallan en el siguiente apartado.

Otra medida adoptada en el modelo numérico es la unión de nodos comunes. Esta operación consiste en fusionar nodos que se encuentren lo suficientemente próximos dentro de una tolerancia definida previamente, de modo que uno de los nodos desaparece y el otro nodo restante pasa a formar parte de dos elementos simultáneamente. Las parejas de superficies sometidas a dicha operación son:

- 1) La parte interior correspondiente al aglomerado debe ir pegada a todas las caras interiores de la viga de acero.
- 2) Las dos tapas de la viga de acero, la superior y la inferior (ver figura 4.2), también deben ir unidas entre sí. La cuestión es si dicha unión debe ser completa o si es necesario que sea puntual para imitar la soldadura por puntos ejecutada en la realidad. Como punto de partida, para las simulaciones se han unido completamente las dos tapas, y más adelante se comprobará si esta decisión influye en la bondad del modelo o no.

Por último, sólo resta abordar la configuración temporal de la simulación.

En primer lugar, hay que establecer un tiempo de simulación que abarque todo el fenómeno que quiere estudiarse. Para las velocidades de impacto analizadas, un tiempo de cinco a quince milisegundos es más que suficiente.

Otro parámetro que hay que configurar es el paso de tiempo. Con este parámetro se pueden determinar la cantidad de datos que se registran por cada unidad de tiempo durante la simulación. Más adelante se estudiará la elección de este parámetro en profundidad.

Para finalizar este apartado, cabe decir que, con el propósito de simplificar el problema, en las primeras fases de la puesta a punto se han suprimido del modelo tanto el mártir de aluminio como el aglomerado, quedando solamente el impactor, la viga de acero y un único soporte inferior para la simulación. Más adelante, cuando se ha requerido, se han vuelto a añadir las partes sustraídas al modelo.

4.2.2 Propiedades de los materiales.

En el ensayo intervienen diversos elementos (ver figura 4.2), cada uno de ellos formado por un material específico.

La viga cuenta con una parte interior, correspondiente al aglomerado de caucho reciclado, y una chapa exterior de acero galvanizado. En el caso del caucho, se plantea el cálculo empleando el modelo BB. En cuanto a la chapa de acero, se ha estudiado como un material elástico. En ambos casos, las características introducidas son las que ya se han enumerado en el epígrafe 3.

El impactor es de acero, y se considera un material rígido para simplificar los cálculos, puesto que las deformaciones experimentadas por este elemento no son objeto de interés de este estudio y comparativamente son muy inferiores a las del modelo analizado. Su módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson son indiferentes, precisamente por tratarse de un material rígido. Por otra parte, como el volumen del impactor es el mismo en todos los casos simulados, hay que modificar la densidad en cada caso para obtener la masa con la que se realiza cada ensayo.

El tercer elemento, el mártir, es de aluminio, cuyo tratamiento es idéntico al de la chapa de acero galvanizado, es decir, material elástico. Sus propiedades son las que ya se han enumerado en el epígrafe 3.

Por último, el cuarto elemento son los soportes de forma cilíndrica, cuya única función es actuar como apoyos rígidos de la viga y que el extremo sobre el que trabajan permanezca fijo. Por tanto, para su definición lo único relevante es que se trata de un material rígido, sin ningún grado de libertad, al que se le imponen restricciones a todos los movimientos y rotaciones.

4.2.3 Tipo de elemento.

Como ya se ha indicado en capítulos previos, LS Dyna® cuenta con diversos tipos de elementos, cada uno con una geometría, una distribución de los nodos y un tipo de integración concreto. La elección de un tipo de elemento u otro influirá tanto en el consumo de recursos computacionales como en la bondad de los resultados, así que hay que seleccionar una clase que se sepa con seguridad que es fiable, y que dentro de lo posible ahorre tiempo de cálculo.

En este apartado, se van a abordar varios tipos de formulaciones, y la nomenclatura que se va a emplear para designar a cada tipo es la que se recoge en la tabla 4.1.

La primera idea es utilizar elementos con integración reducida y sin control de *hourglassing* (modelo E1H1 en adelante). No obstante, no es una buena elección, ya que, observando la figura 4.3, puede apreciarse que la deformación a la que es sometida la viga es excesiva y nada fiel a la realidad.

Tras estos malos resultados, cabe pensar que una posible razón a este desajuste sea no haber controlado debidamente el *hourglassing*, fenómeno que ya se ha explicado

previamente. Ante esta situación, se plantea la necesidad de modificar tanto la formulación del elemento como el parámetro de control del *hourglassing* para ver si hay alguna mejora en los resultados proporcionados por la simulación.

Tabla 4.1: Nomenclatura utilizada para designar las diferentes formulaciones estudiadas.

Designación	Significado
E1	Elemento hexaédrico de 8 nodos con integración reducida.
E2	Elemento hexaédrico de 8 nodos con integración completa, especial para relaciones de aspecto pobre ³ .
E3	Elemento hexaédrico de 8 nodos con integración completa.
H1	Sin control de <i>hourglassing</i> .
H3	Con control moderado de <i>hourglassing</i> .
H5	Con control estricto de <i>hourglassing</i> .

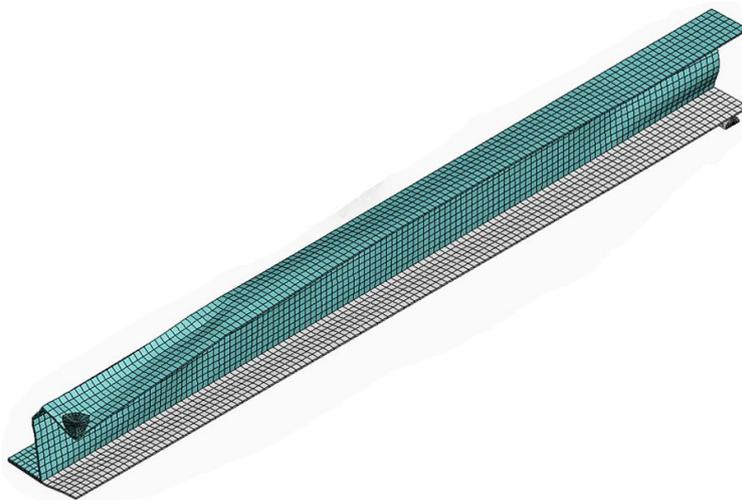


Figura 4.3: Estado de deformación de la viga para el modelo E1H1.

Hay dos posibles formas de evitar que aparezca el *hourglassing*:

- La primera opción es emplear una formulación para elementos más exacta, como puede ser el caso de utilizar elementos hexaédricos de 8 nodos con integración completa. En el caso de la viga, al ser el espesor del elemento mucho menor que el ancho y el largo de su cara principal, parece adecuado decantarse por la formulación para relaciones de aspecto pobre. Si se emplea dicha formulación, no es necesario introducir un parámetro de control del *hourglassing*. Por tanto, esta primera opción consiste en utilizar elementos con integración completa para elementos de aspecto pobre y sin control de *hourglassing* (modelo E2H1 en

³ Una relación de aspecto pobre es aquella en la que el elemento tiene una de sus dimensiones mucho más pequeña o mucho más grande en comparación con las demás.

adelante). Si bien este método garantiza que todas las soluciones calculadas son físicamente posibles, también ralentiza significativamente el proceso de cálculo, así que es una alternativa que sólo debe contemplarse en caso de que las demás no sean fiables.

- La segunda opción que se plantea es mantener la primera formulación considerada con integración reducida, introduciendo un parámetro de control del fenómeno de *hourglassing*. Este control consiste básicamente en añadir viscosidad, o en un caso más restrictivo rigidez, a los elementos que componen el modelo, en base a las formulaciones de Flanagan y Belytschko [15]. Esto quiere decir que dicho parámetro puede ejercer un control más exhaustivo (modelo E1H5) o un control menos restrictivo (modelo E1H3) sobre el *hourglassing*. De este modo, se pretende garantizar la fiabilidad de los resultados, consiguiendo ahorrar tiempo de computación respecto a un caso donde se emplee formulación más exacta.⁴

Al emplear el modelo E1H3, se ha observado una deformación similar a la del primer modelo, como se muestra en la figura 4.4.

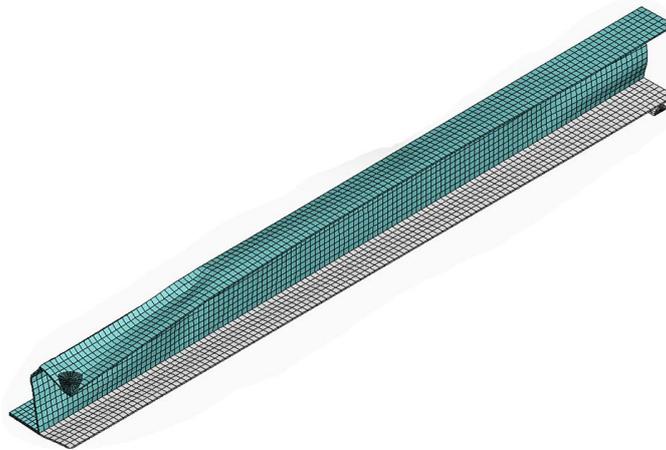


Figura 4.4: Estado de deformación de la viga para el modelo E1H3.

Si además se comparan los resultados numéricos obtenidos con los modelos E1H3 y E1H1, representados en la figura 4.5, con una velocidad de 2 m/s y una masa de 5.3 kg,

⁴ Si bien el tiempo de ejecución del presente modelo puede no ser un parámetro decisivo a la hora de decantarse por una u otra formulación, sí que puede serlo cuando se trabaje con un modelo más pesado, hablando en términos computacionales. No se debe olvidar que, como ya se introdujo, uno de los objetivos de este trabajo es desarrollar un modelo capaz de calcular una situación a escala 1:1.

se observa una gran semejanza entre ambas curvas, de modo que todo indica que este modelo no consigue eliminar los efectos del *hourglassing*.

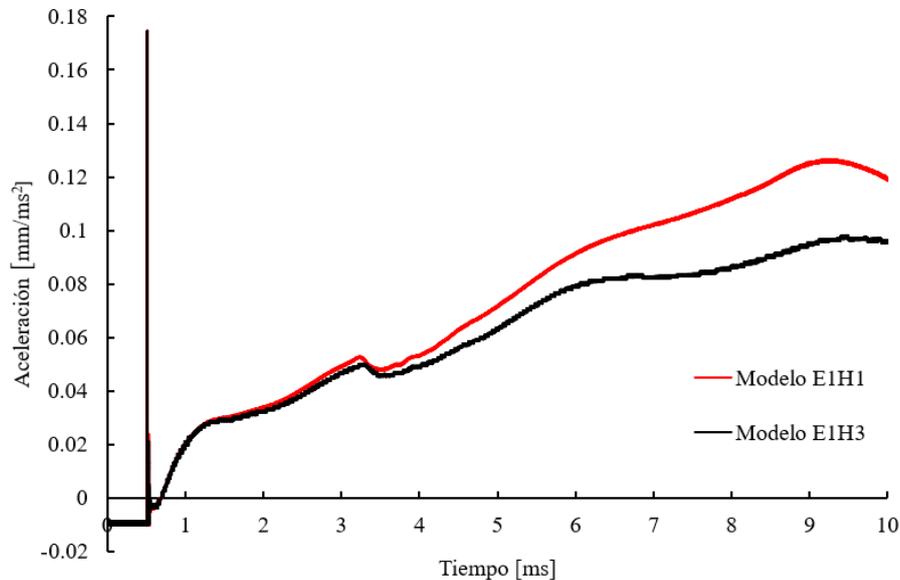


Figura 4.5: Curvas de aceleración frente al tiempo obtenidas con los modelos E1H1 y E1H3.

En cambio, al ejecutar los modelos E1H5 y E2H1 se ha observado en ambos casos una deformación de la viga bastante razonable, como se aprecia en la figura 4.6.

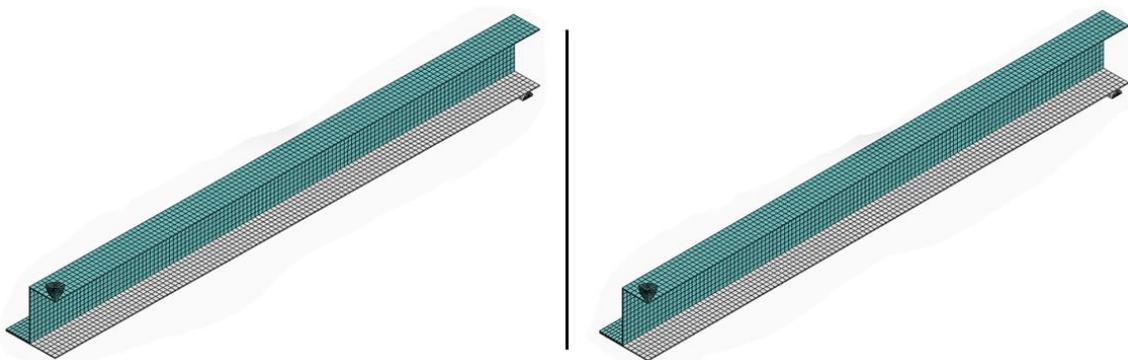


Figura 4.6: Estado de deformación de la viga para los modelos E2H1 (izquierda) y E1H5 (derecha).

En cuanto a los resultados numéricos obtenidos con una velocidad de 2 m/s y una masa de 5.3 kg, en la figura 4.7 puede verse cómo ambas curvas son prácticamente idénticas. Nótese, además, que empieza a intuirse el mismo perfil de gráfica que ya se observó en el apartado anterior con los resultados experimentales. Para que esto último pueda verse con más claridad, se ha incluido en la figura 4.7 el resultado de un ensayo con la viga nº1 a 2 m/s con una masa de 5.3 kg.

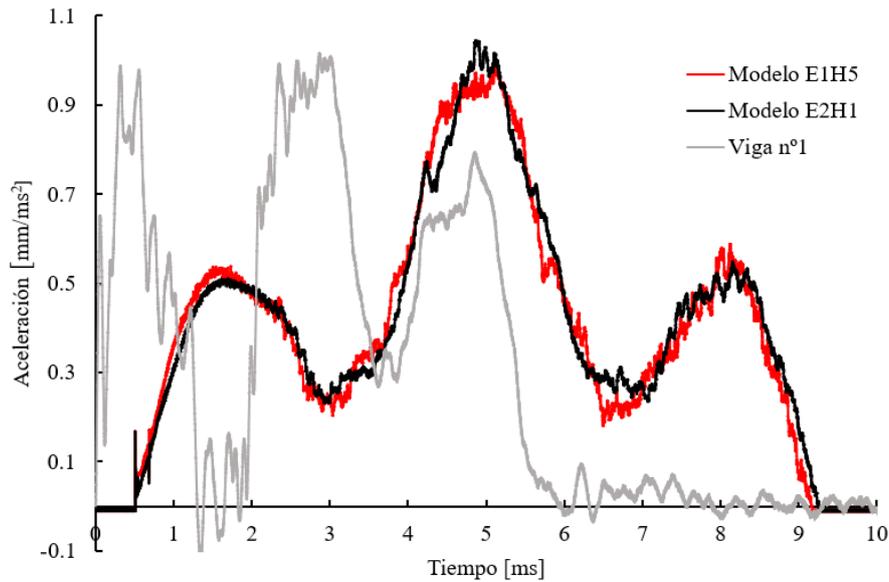


Figura 4.7: Curvas de aceleración frente al tiempo obtenidas con los modelos E1H5 y E2H1.

Sin embargo, aunque a simple vista puede parecer que el modelo E1H5 es válido, falta una comprobación por hacer: si realmente se anula por completo el efecto del *hourglassing*, al representar el resultado de la *Energía de hourglassing* debería salir un resultado nulo, tal y como ocurre con el modelo E2H1. Por el contrario, para el caso E1H5, este resultado no vale cero, como puede observarse en la figura 4.8.

Por tanto, queda comprobado que el modelo E1H5 no es lo suficientemente restrictivo para evitar la aparición de este fenómeno.

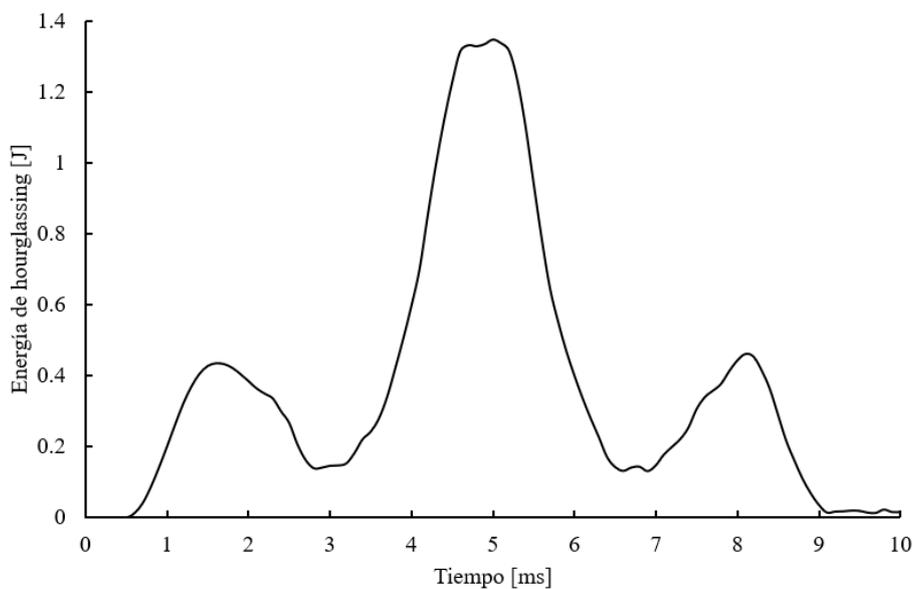


Figura 4.8: Resultado de energía de hourglassing obtenido con el modelo E1H5.

De este modo, este punto se puede concluir diciendo que el modelo más fiable que se ha hallado para este estudio es el E2H1: elementos hexaédricos de ocho nodos con integración completa para elementos de aspecto pobre y sin control de *hourglassing*.

4.2.4 Análisis de convergencia de malla.

En el MEF, el tamaño de la malla es muy importante. En teoría, cuanto más fino sea el mallado, más cercano debería ser el resultado numérico al resultado exacto. Sin embargo, un mallado excesivamente pequeño va a consumir demasiado tiempo de computación y es posible que la precisión que aporte sea a unos niveles prácticamente despreciables. Adicionalmente, en ciertas situaciones un tamaño de elemento excesivamente pequeño puede provocar errores de convergencia, de modo que no sea posible hallar la solución del problema. Teniendo todo esto en cuenta, se puede decir que un buen mallado será aquél que nos ofrezca unos resultados precisos según nuestro criterio y consuma un tiempo razonable de computación.

Una vez que se ha hallado un tipo de elemento en el apartado anterior que es fiable, el siguiente paso es estudiar la convergencia de resultados de dicho modelo con tres tamaños diferentes de malla.

Los tamaños de malla estudiados son los siguientes: un tamaño intermedio con elementos de 5 mm (malla B); un tamaño grande, con elementos el doble de grandes que el modelo previo, es decir, 10 mm (malla A); un tamaño pequeño, con elementos que son la mitad de los del primer modelo, es decir, 2.5 mm (malla C). Estos tres tamaños de malla aparecen representados en la figura 4.9. Nótese que sólo hay modificaciones de tamaño en la malla de la viga, puesto que tanto el soporte como el impactor, al ser elementos rígidos, no se ven afectados por los cambios de la malla.

Una vez presentados los tamaños utilizados, se muestran los resultados obtenidos con el modelo E2H1 en la figura 4.10, para una velocidad de 2 m/s y una masa de 5.3 kg. Es evidente que, con esta clase de formulación, el modelo está lejos de converger hacia un resultado. Por tanto, aunque se han anulado los efectos producidos por el *hourglassing*, el modelo E2H1 sigue sin ser fiable.

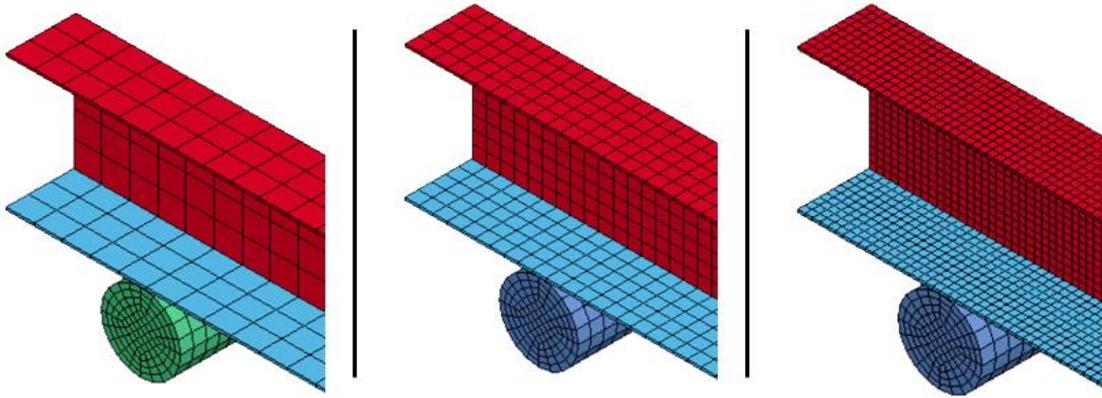


Figura 4.9: Tamaños de malla estudiados. De izquierda a derecha son: malla A, malla B y malla C.

Observando estos resultados, se llega a la conclusión de que resulta necesario utilizar otro tipo de formulación. Se han empleado, entonces, elementos cuadráticos de 8 nodos con integración completa, sin tener en cuenta la relación de aspecto pobre. Este modelo se denominará E3H1.

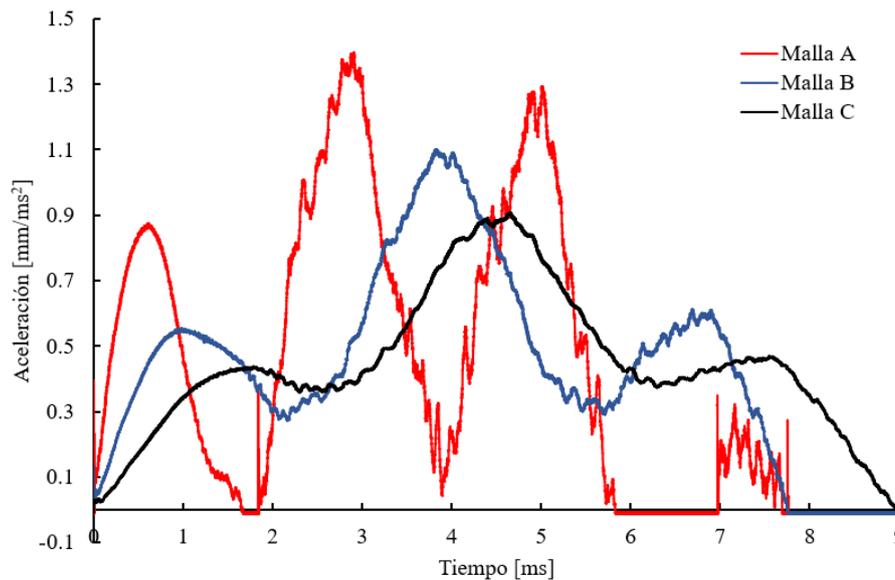


Figura 4.10: Resultados de aceleración obtenidos con el modelo E2H1.

Finalmente, como puede observarse en la figura 4.11, con el modelo E3H1 se produce la convergencia del resultado. En dicha figura, aparecen los resultados con los tres tamaños de malla, además del resultado obtenido con la viga n°1, todos ellos para unas condiciones de ensayo de 2 m/s y 5.3 kg.

Al observar la figura 4.11, lo primero que se advierte es que las tres curvas numéricas tienen importantes similitudes y diferencias respecto a los resultados experimentales:

- Entre las similitudes, se incluyen el valor del máximo y el aparente número de rebotes, ya que en todos los casos hay tres picos en las curvas.
- Entre las diferencias, se encuentran el valor alcanzado por cada rebote y las zonas de máximos y mínimos de las curvas, así como la duración del fenómeno.

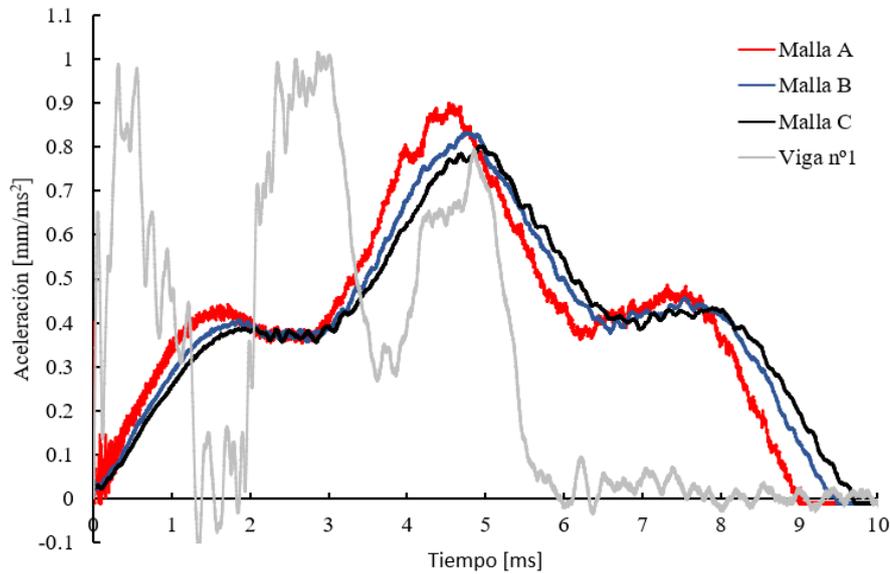


Figura 4.11: Resultados de aceleración obtenidos con el modelo E3H1.

Comparando los tres resultados numéricos entre ellos, son muy similares, puesto que el primer y el tercer pico alcanzan valores comprendidos entre 0.4 y 0.5 mm/ms², y el pico intermedio llega a un valor en torno a 0.8 mm/ms² en todos los casos (aunque en el modelo A alcanza incluso 0.9 mm/ms²).

En lo que al tiempo de impacto se refiere, si bien los modelos B y C tienen duraciones aproximadas de 9.5 ms, en este aspecto el modelo A se desajusta levemente, puesto que la duración de la simulación en dicho caso se acorta hasta los 9 ms.

Por último, en la tabla 4.2, se recoge, a modo de resumen, la información relevante de cada modelo: el tamaño de elemento, el valor de la fuerza máxima, el parámetro \overline{HIC} y el tiempo de computación requerido para realizar el cálculo.

Tabla 4.2: Comparación entre los tres tamaños de malla calculados.

Malla	Tamaño [mm]	F _{max} [N]	Variación (%)	\overline{HIC}	Variación (%)	Tiempo de computación
A	10	4770	8.16	105.97	0.18	3 min 38 s
B	5	4410	3.76	105.78	0.03	11 min 46 s
C	2.5	4250	-	105.74	-	48 min 44 s

Nota: los porcentajes de variación se han obtenido aplicando la expresión (4.2).

$$\text{Variación} = \frac{X_j - x_j}{x_j} \cdot 100 \quad (4.2)$$

Siendo:

X_j : valor de la variable proporcionado por el tamaño de elemento que se está estudiando.

x_j : valor de la variable proporcionado por el tamaño de elemento inmediatamente superior al que se está estudiando.

Con toda esta información, se pueden sacar algunas conclusiones:

- Para empezar, está claro que el modelo A es demasiado grosero, ya que genera una variación demasiado elevada de fuerza máxima, superior al 5%. Por eso, aunque aligera considerablemente el tiempo de computación, no es una buena elección al proporcionar resultados menos precisos en comparación con los otros dos modelos.
- En cuanto al modelo C, tampoco es una buena opción, ya que las diferencias de los resultados respecto a los otros modelos son pequeñas y, sin embargo, el tiempo de computación crece considerablemente. Es, por tanto, más incómodo trabajar con un modelo tan preciso que realmente no marca una gran diferencia con los otros candidatos.
- Por último, el modelo B permite obtener resultados bastante precisos (con variaciones inferiores al 5%). Además, cada simulación con este modelo dura aproximadamente 10 minutos, un tiempo que puede considerarse bastante razonable.

Por todos estos motivos, de aquí en adelante se va a trabajar con el modelo B.

4.2.5 Determinación del paso de tiempo.

La determinación del paso de tiempo no requiere un proceso tan laborioso como la elección del tamaño de elemento de malla. Esto es así porque, como ya se ha adelantado, LS Dyna® tiene una particularidad: conforme avanza el cálculo durante una simulación, se modifica el paso de tiempo según lo requiera la situación. Por tanto, al introducir un valor de paso de tiempo, lo que realmente se está haciendo es asignar un valor inicial para este parámetro. Una vez iniciado el cálculo, este valor no se mantiene constante, como se

puede ver en la figura 4.12. En dicha figura, se representa la evolución del paso de tiempo en cada instante de la simulación, para dos casos con tamaños de elemento diferentes. Los tamaños que se han empleado son los correspondientes a los modelos A y B del apartado anterior. En ambos casos, se ha introducido el mismo paso de tiempo inicial. En cambio, puede observarse que, en los dos modelos simulados, el paso de tiempo se hace aún más fino a mitad de la simulación, y posteriormente vuelve a hacerse más grande, para terminar con un valor similar al inicial.

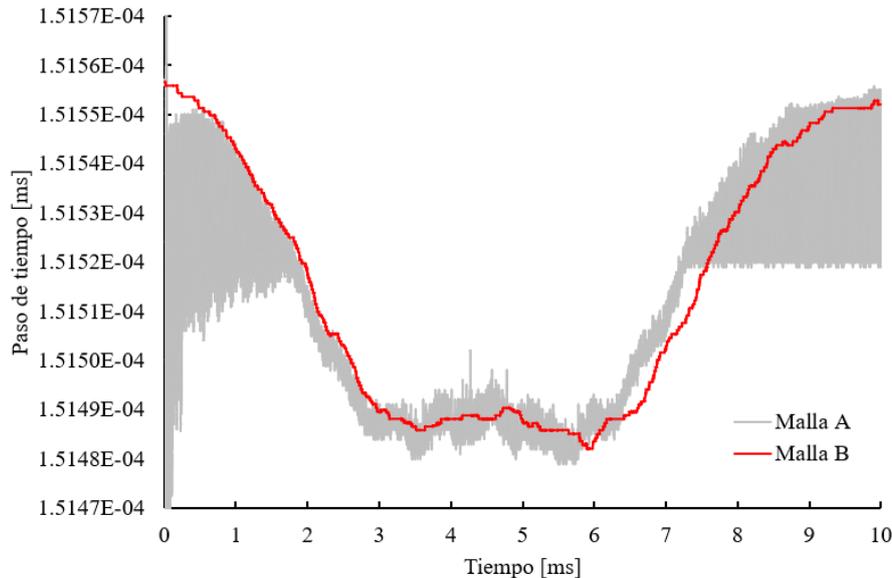


Figura 4.12: Variación del paso de tiempo en cada instante de la simulación correspondiente a dos tamaños de malla.

Es de destacar que la simulación del modelo A ha requerido muchos más cambios de paso de tiempo que el modelo B. En la figura 4.12, la curva del modelo B está completamente definida, mientras que la del modelo A hace continuamente fluctuaciones, de manera que es imposible distinguir el recorrido exacto que lleva a cabo. Únicamente se puede intuir que la tendencia es similar en ambos modelos.

Una vez analizado el funcionamiento de los pasos de tiempo en LS Dyna®, se puede concluir que basta con introducir un parámetro inicial y despreocuparse del control de dicho parámetro, pues el programa se encarga de su control automáticamente.

4.3 Resultados finales.

Una vez decididos el tamaño y la clase de elemento que se van a utilizar sólo falta añadir dos de los componentes de los que se había prescindido hasta ahora, es decir, el mártir y el apoyo superior.

En este primer cálculo, las hipótesis de las que se parten son las siguientes:

- A. Las uniones soldadas por puntos se simplifican haciendo que las dos tapas de la viga estén completamente unidas.
- B. El apoyo superior, al igual que el inferior, es completamente rígido.
- C. El mártir tiene las propiedades enumeradas en el epígrafe 3.
- D. La unión entre la viga y el mártir es perfecta.
- E. Al ser rígido el impactor, es irrelevante si se simula por completo o sólo el extremo que golpea la viga.
- F. La rigidez de la viga coincide con la que se ha obtenido del acero en los ensayos estáticos de tracción del epígrafe 3.

En la figura 4.13 se representa el resultado de la fuerza en función del tiempo calculado en esta primera simulación junto al obtenido del ensayo de taller con la viga nº1, ejecutados ambos en las mismas condiciones, con una velocidad de impacto de 2 m/s y una masa del impactor de 5.3 kg. Para obtener $F(t)$ en el caso de la simulación, se ha recurrido a la expresión (2.3).

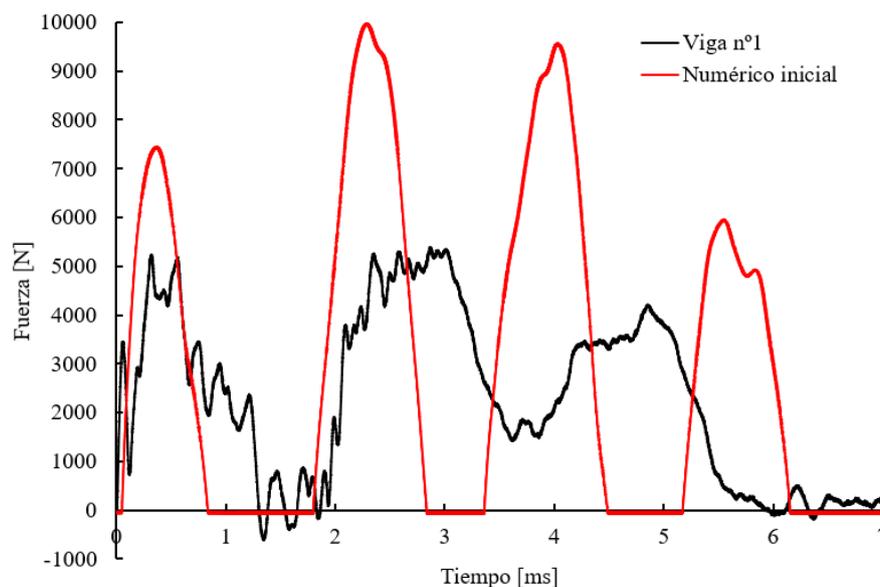


Figura 4.13: Comparación entre el resultado de la viga nº1 y el del modelo numérico inicial.

En ambos casos, el impacto tiene una duración aproximada de 6 ms, y es notable la mejoría respecto a los resultados mostrados en la figura 4.11. Aun así, saltan a la vista una serie de diferencias.

En primer lugar, lo más llamativo es que en la curva experimental sólo aparecen tres picos, mientras que en la curva numérica esta cifra asciende a cuatro. Esto quiere decir que en la simulación se producen cuatro contactos y en el ensayo de taller únicamente son tres los impactos.

Otra diferencia significativa son los valores numéricos. En la curva experimental, los máximos están en torno a 5000 N; en cambio, en la curva numérica estos valores prácticamente se duplican, alcanzando valores cercanos a 10000 N. Algo positivo de esta comparación es que los dos primeros picos de ambas curvas se alcanzan en torno al mismo instante de tiempo, indicador de que no está tan desencaminado el modelo numérico.

Es evidente que este modelo aún está lejos de reproducir la realidad. La discrepancia entre los valores es muy probable que se deba a que la viga de las simulaciones presenta mucha más rigidez que la viga real. Por tanto, una posible estrategia para acercar ambos resultados es reducir la rigidez del modelo numérico, algo que puede hacerse modificando las hipótesis de partida. Las modificaciones que se han probado en el modelo son las que se enumeran a continuación:

- Se ha incluido el efecto de la soldadura en el modelo (modificación de la hipótesis A), uniéndolo únicamente los nodos correspondientes a la soldadura en lugar de las caras en contacto íntegramente. En un principio, se despreció el efecto de las soldaduras considerando que el error que generaba esta simplificación era pequeño. Evidentemente, esto no es así en la realidad, pues las uniones puntuales entre ambas tapas reducen la rigidez de la viga, y observando los resultados anteriores es posible que esta reducción sea notable.
- Se han modificado las características del mártir de aluminio (modificación de la hipótesis C). Es posible que las propiedades de este elemento no sean las que se han supuesto, pues no se ha realizado ningún ensayo para caracterizar dicho material. Por ende, se ha considerado un aluminio menos rígido, con módulo de elasticidad igual a 60 GPa, siendo el anterior utilizado de 70 GPa, para tratar de corregir el número de contactos.

- Se ha suprimido el apoyo superior de la viga (modificación de la hipótesis B). De esta manera, se puede verificar si la rigidez de este apoyo es la que se había supuesto o si es inferior.
- Se ha modificado el módulo de elasticidad del acero de la viga (modificación de la hipótesis F). Ya se indicó en apartados anteriores que la caracterización de dicho material se llevó a cabo con un ensayo estático de tracción. No obstante, en apartados previos se ha demostrado que la rigidez de la viga como conjunto es inferior a la del material del que está fabricada, en condiciones estáticas. La razón de esto es que hay factores potenciales de disminuir la rigidez del sistema que se está estudiando y que no han sido considerados. En primer lugar, la naturaleza imperfecta de las soldaduras, que, aunque se tengan en cuenta en el modelo, no son uniones puntuales perfectas en la realidad, y pueden sufrir daños y deformaciones. En segundo lugar, tanto las fuerzas aplicadas como las reacciones de los apoyos no actúan sobre el eje neutro de la viga, lo que puede producir un desajuste entre la rigidez real y la teórica, pues no hay que perder de vista que, en las teorías clásicas, todas las acciones sobre una viga actúan sobre su centro de gravedad.

Observando la figura 4.14, se puede deducir que las dos primeras modificaciones planteadas han producido unos cambios bastante tibios en el resultado. En el caso de la modificación de la hipótesis A, se ha reducido la altura de los picos, aunque no lo suficiente. Aun así, se ha optado por introducir esta mejora en las simulaciones restantes. Por el contrario, la modificación de la hipótesis C no ha añadido ningún cambio a los resultados. Por tanto, esta segunda modificación no ha sido considerada para el resto de los cálculos.

Por el contrario, las modificaciones de las hipótesis B y F han demostrado producir cambios notables en la rigidez del modelo, que merecen la pena ser analizados más en profundidad.

Respecto a la hipótesis B, en la figura 4.15 puede apreciarse cómo los picos de los resultados numéricos se han reducido hasta quedarse en una zona más cercana a los picos experimentales. Tanto el primer pico como el segundo comienzan a ajustarse a sus equivalentes de la gráfica del ensayo experimental. No obstante, sigue habiendo desajustes: el tercer pico numérico es mucho mayor que el experimental, y no se ha

conseguido eliminar el cuarto pico. Aun así, esta es la primera de las hipótesis estudiadas que ha demostrado una gran mejoría en el modelo.

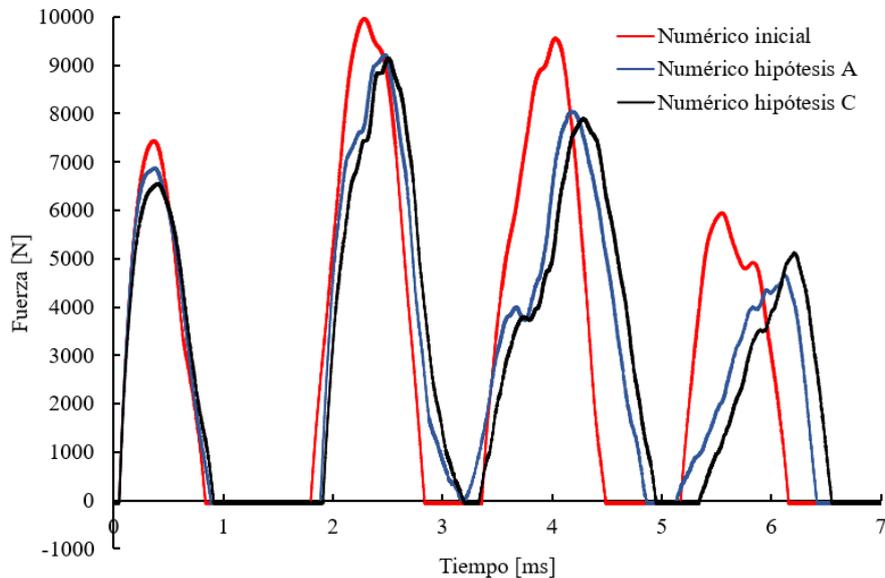


Figura 4.14: Comparación de los resultados obtenidos con las modificaciones de las hipótesis A y C y el modelo numérico inicial.

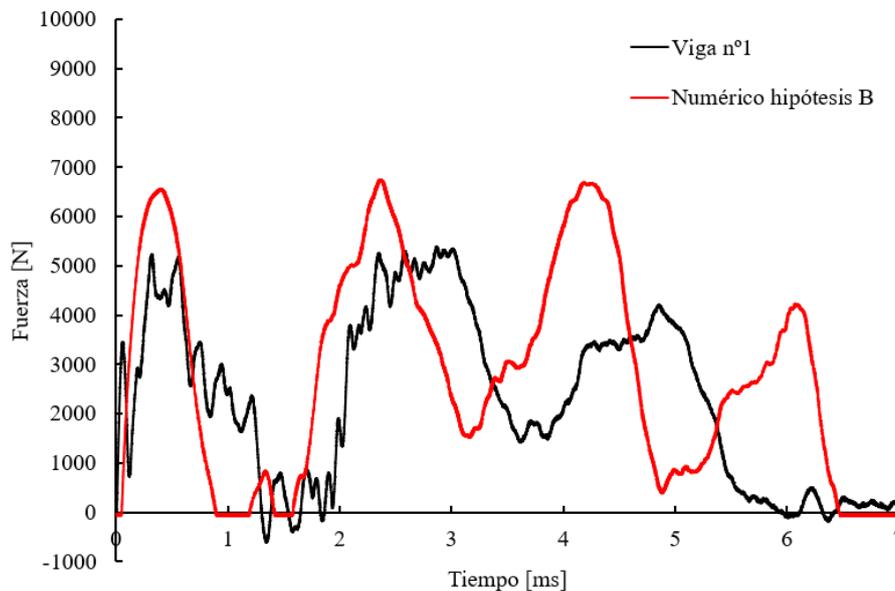


Figura 4.15: Comparación entre el resultado de la viga n°1 y el de la hipótesis B modificada.

Tras todas estas observaciones, queda claro que la rigidez del apoyo superior no es tan elevada como se había considerado. En cuanto al apoyo inferior, con este resultado surgen dudas de si realmente éste se puede considerar como infinitamente rígido o no. Ante esta situación, lo ideal sería estudiar cómo influye la rigidez de los apoyos en el comportamiento de la viga, pero esa cuestión no es parte de este trabajo.

Por tanto, la dirección tomada ha sido la de eliminar el apoyo superior y mantener el inferior con rigidez infinita, asumiendo un cierto error. Del mismo modo, se ha utilizado un apoyo simple en los ensayos experimentales para reducir lo máximo posible el error generado por esta cuestión.

Respecto a la hipótesis F, para cuantificar la sensibilidad del resultado ante los cambios en el módulo de elasticidad de la viga, se ha decidido obtener el resultado para la mitad del módulo del acero obtenido en los ensayos de tracción (92.23 GPa).

Este resultado, junto al de la viga nº1, pueden verse en la figura 4.16. En dicha figura, queda reflejado que esta modificación, al igual que la anterior comentada, mejora los resultados obtenidos. A la vista de dichos resultados, parece razonable emplear el módulo de elasticidad obtenido del ensayo de flexión (detallado en el epígrafe 3), denominado módulo de elasticidad efectivo ($E_{efectivo}$), con un valor de 117 GPa.

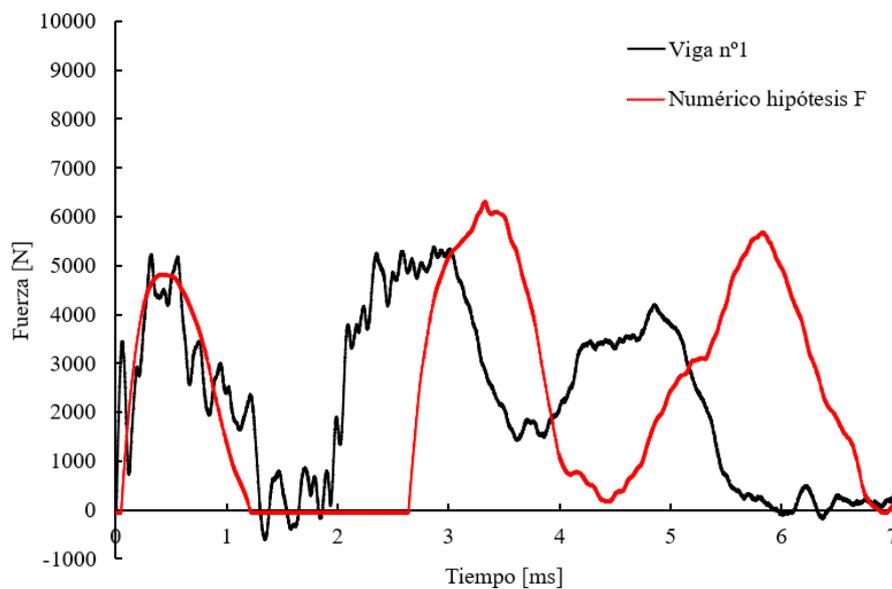


Figura 4.16: Comparación entre el resultado de la viga nº1 y el de la hipótesis F modificada.

Una vez completado el estudio de todas las modificaciones planteadas, se ha llegado a la conclusión de que tanto la influencia del apoyo como la de la rigidez de la viga son determinantes en la obtención de unos buenos resultados. Lo único que queda para dar por concluido este apartado, es combinar ambas hipótesis modificadas y estudiar la bondad del modelo obtenido. Los resultados obtenidos con el modelo definitivo son los que aparecen en la figura 4.17.

Finalmente, se ha logrado una buena convergencia entre los resultados numéricos y experimentales. Si bien es cierto que no se ha logrado eliminar el cuarto pico, la aproximación de los otros tres picos es muy buena, por lo que basta con no considerar el cuarto pico para el estudio y aceptar el resultado.

En el próximo capítulo, se hará una comparación en profundidad de estos dos resultados.

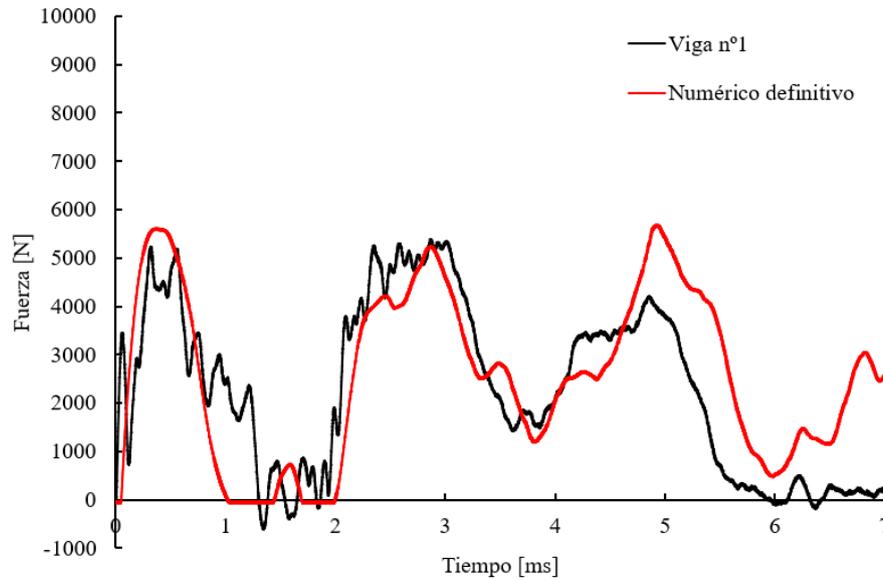


Figura 4.17: Comparación entre el resultado de la viga n°1 y el del modelo numérico definitivo.

5. CORRELACIÓN NUMÉRICO-EXPERIMENTAL.

En este capítulo se estudiará a fondo la semejanza entre los resultados de las simulaciones y los de los ensayos, para concluir si el modelo numérico es bueno o por el contrario hay que seguir afinándolo en futuras investigaciones.

En primer lugar, se va a considerar el caso de una viga formada exclusivamente por chapa de acero. En la figura 5.1, aparece una representación de dichos resultados, tanto numéricos como experimentales. Se ha escogido para la comparación una de las diversas gráficas experimentales obtenidas, pues se considera que los ensayos han sido suficientemente repetitivos para que un único resultado ilustre las características del fenómeno que se está estudiando. Las condiciones del impacto representado son: velocidad de impacto de 2 m/s y masa del impactor de 5.3 kg.

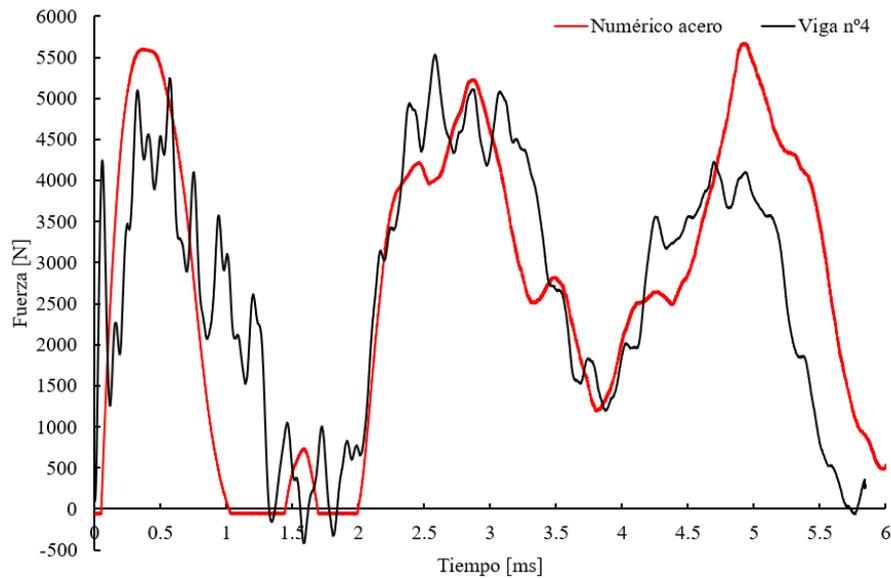


Figura 5.1: Resultados numéricos y experimentales obtenidos con una viga de acero para un impacto a 2 m/s y una masa del impactor de 5.3 kg.

Un primer análisis cualitativo demuestra que el modelo numérico se aproxima muy bien a lo que ocurre en la realidad, ya que, como se refleja en la figura 5.1, los dos primeros picos se ajustan tanto en magnitud como en tiempo.

A continuación, en la tabla 5.1, a modo de resumen, se incluyen los parámetros característicos obtenidos de las curvas de los ensayos de taller. También se han recogido en dicha tabla los valores medios, así como su dispersión, considerando éstos como representativos del fenómeno que se está estudiando, y por tanto, serán los que se van a comparar con los resultados numéricos.

Tabla 5.1: Resumen de resultados experimentales obtenidos con una viga de acero.

	Viga nº 4	Viga nº 5	Viga nº 6	Valores medios
\overline{HIC}_{06}^5	109.97	119.12	116.30	117.66 ± 3.35
	118.65	117.55	119.23	
	116.49	121.93	119.66	
F_{\max} [N]	4916.40	5136.30	4931.52	5124.66 ± 307.48
	5438.81	5010.64	4865.20	
	5528.40	5555.16	4739.54	

Una vez obtenidos los resultados de los ensayos de taller, ya es posible realizar una comparación cuantitativa entre los resultados numéricos y experimentales, tal y como se refleja en la tabla 5.2.

Tabla 5.2: Comparación entre los resultados numéricos y experimentales obtenidos con una viga de acero.

	Numérico	Experimental	Variación (%)
\overline{HIC}_{06}	116.63	117.66 ± 3.35	0.88
F_{\max} [N]	5670.26	5124.66 ± 307.48	10.65

En dicha tabla, figuran tanto los parámetros característicos (\overline{HIC} y fuerza máxima) como la variación obtenida en la simulación, respecto al valor experimental aplicando (4.2).

En primer lugar, si se observa la fuerza máxima, puede notarse que ésta es mayor en el modelo numérico, con una diferencia superior al 5%. Esta discrepancia puede deberse a que el modelo numérico sigue siendo más rígido que el de la realidad, puesto que ya se indicó en el apartado anterior que se está asumiendo cierto error al considerar el apoyo inferior como infinitamente rígido. Otra posibilidad es que esta variación observada también se encuentre influida por la dispersión de los valores experimentales.

En cambio, el \overline{HIC} tiene una aproximación muy buena, con un error inferior al 1%. De esta observación se puede concluir que, si bien la fuerza máxima es algo superior a lo esperado, el impacto en términos globales es igual de severo en ambos casos.

Como reflexión final a este primer análisis, se puede afirmar que el modelo numérico representa con fiabilidad las características del fenómeno que se ha estudiado.

Una vez caracterizado el comportamiento de la viga hueca en régimen elástico, ya estamos en condiciones de añadir al modelo el aglomerado de caucho reciclado para

⁵ En este apartado, con el objeto de poder comparar adecuadamente los resultados, se ha aplicado el \overline{HIC} en un mismo intervalo de tiempo tanto para el caso experimental como el caso numérico. La longitud del intervalo se especifica, en milisegundos, en el subíndice.

estudiar el comportamiento del sistema conformado por dos materiales, acero y aglomerado (viga compuesta).

Siguiendo una metodología idéntica al caso anterior, se va a realizar un estudio cualitativo mediante la observación de la representación gráfica de los resultados, mostrados en la figura 5.2. En esta figura, se observan algunas diferencias entre ambos modelos que no han aparecido en el caso de una viga de acero.

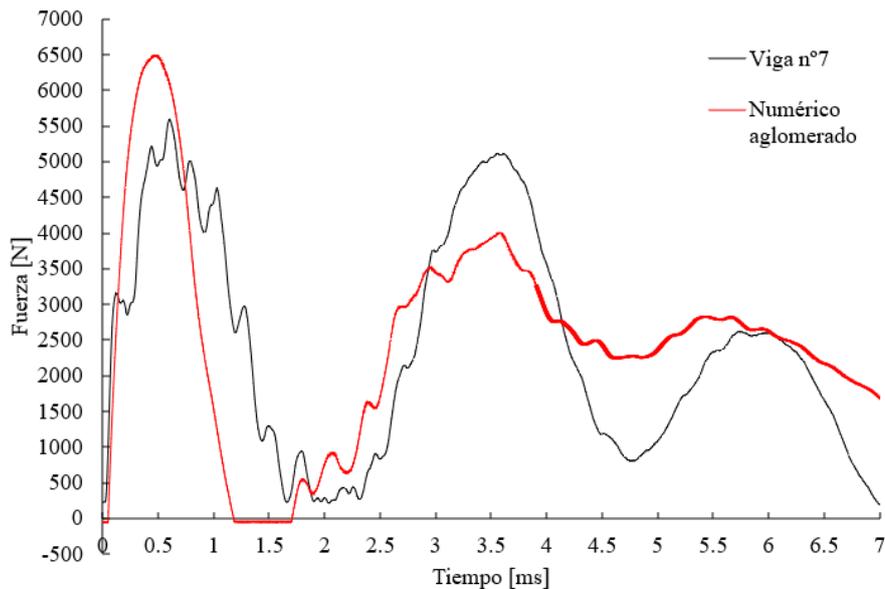


Figura 5.2: Resultados numéricos y experimentales obtenidos con una viga compuesta para un impacto a 2 m/s y una masa del impactor de 5.3 kg.

En primer lugar, la duración de los impactos no es la misma, puesto que el caso experimental se extiende hasta unos 7 milisegundos, mientras que el numérico alcanza los 8 milisegundos.

En segundo lugar, la intensidad de los picos es diferente, ya que el primer pico es más grande en el caso numérico, pero el segundo es más elevado en el caso experimental. Por otra parte, el tercer pico es el que más semejanza presenta entre ambos resultados.

Las discrepancias que se aprecian visualmente entre ambos resultados no son superiores a las que se pueden encontrar en trabajos de investigación especializados en este tipo de análisis (véase [17, 18]). Por otra parte, las similitudes encontradas indican que el modelo es adecuado: el número de picos, así como su posición, coinciden, y la tendencia al amortiguamiento también está presente.

Una vez analizados cualitativamente los resultados, como en el caso anterior, ahora procede efectuar un estudio cuantitativo de los mismos, que se refleja en la tabla 5.3.

Tabla 5.3: Comparación entre los resultados numéricos y experimentales obtenidos con una viga compuesta.

Experimental		Numérico		Variación (%)	
\overline{HIC}_{07}	F_{\max} [N]	\overline{HIC}_{07}	F_{\max} [N]	\overline{HIC}_{07}	F_{\max} [N]
101.75	5599.38	74.06	6486.22	27	11
100.24	5768.08				
102.50	6070.59				
101.50 ± 1.15	5812.68 ± 238.90				

En este segundo caso con una viga compuesta, las diferencias entre ambos modelos son las siguientes: en el caso del \overline{HIC} , la variación es de un 27%, y en el caso de la fuerza máxima, esta diferencia es del 11%.

Tras este análisis, una de las conclusiones que se obtiene es que probablemente los parámetros utilizados para el modelo BB no son suficientemente buenos, y, por tanto, es preciso continuar la caracterización de dicho modelo. Aun así, cabe destacar la buena aproximación obtenida en los resultados, a pesar de no contar con un modelo BB suficientemente preciso.

Además, en este apartado también se saca una conclusión muy interesante relacionada con el efecto del aglomerado: en el modelo numérico, el \overline{HIC} experimenta una gran reducción al añadir este material. Como ya se ha explicado, este parámetro sirve para evaluar la severidad de un impacto teniendo en cuenta tanto su intensidad como su duración, así que una disminución de su valor se traduce en un impacto menos dañino para el elemento que colisiona. En este caso, al pasar de 116.63 a 74.06, el \overline{HIC} ha experimentado una reducción del 37%, aunque esta variación es susceptible de cambiar al afinar la caracterización del material BB.

Para finalizar este apartado, cabe remarcar una última cuestión: hasta el momento, para el modelo desarrollado se han empleado elementos sólidos (tridimensionales), aunque también cabe la posibilidad de utilizar elementos lámina (bidimensionales). Se ha generado un modelo con este tipo de elementos, cuyos resultados pueden consultarse en el Anexo 5. Resultados obtenidos con el modelo de elementos tipo lámina, y se ha llegado a la conclusión de que el mejor resultado es aquel proporcionado por el modelo de elementos sólidos desarrollado en este trabajo.

6. CONCLUSIONES.

En este capítulo, se enumeran todas las conclusiones que se han obtenido tras realizar todo el trabajo descrito anteriormente.

En primer lugar, se han fabricado unos especímenes para ensayos de impacto en formatos de material metálico y combinación metálico-viscoelástico. Dichos especímenes se han ensayado bajo carga de impacto en régimen elástico bajo distintas condiciones de velocidad y masa, poniendo de manifiesto la repetibilidad del ensayo.

Tras llevar a cabo una importante labor de modelización, analizando cuestiones como la convergencia de los resultados en función de la malla, la bondad de los modelos bi y tridimensional, el efecto del *hourglassing* en los cálculos o el empleo de una rigidez efectiva (que tiene en cuenta el comportamiento global del espécimen y la influencia de la soldadura por puntos), se ha obtenido un modelo numérico que proporciona resultados fiables en régimen elástico, y que sirve como punto de partida para la realización de un modelo a escala 1:1.

Con este modelo, ha sido posible evaluar la severidad de los impactos en sistemas de diferente índole, tanto formados por dos materiales como por un único material, a través del \overline{HTC} y la fuerza máxima, convenientemente adaptados a las características del impacto analizado. Asimismo, a través de estos parámetros, el modelo permite cuantificar la disminución del daño de impacto que produce el añadir un material reciclado con comportamiento viscoelástico al sistema. En los resultados obtenidos en este estudio, esta disminución es bastante notable, lo que quiere decir que el efecto causado por esta combinación de materiales es muy favorable.

Respecto a la correlación numérico-experimental, se han observado discrepancias, tanto en sistemas de un solo material como de dos, aunque dichos desajustes están dentro de lo normal en este tipo de investigaciones [17, 18].

En el primer caso, estas discrepancias pueden deberse a una excesiva rigidez del apoyo inferior, pues ya se ha especificado anteriormente que se está asumiendo un cierto error debido a este aspecto, y a no haber considerado un comportamiento elastoplástico en el mártir de aluminio. Como ya se ha explicado, la campaña de ensayos se ha planificado con el propósito de que la viga de acero no plastifique, pero el aluminio puede haber alcanzado su límite elástico durante dicha campaña.

En el segundo caso, además de las razones del párrafo previo, hay que añadir como posible fuente de error el modelo BB, que no ha sido caracterizado de forma suficientemente precisa, por lo que se debe seguir desarrollando. De todas formas, como ya se ha mencionado en el epígrafe anterior, es notable la gran aproximación obtenida en los resultados de este trabajo.

Para concluir, puede afirmarse que las discrepancias entre los resultados numéricos y experimentales se encuentran dentro de un límite aceptable, y que los resultados proporcionados muestran una correlación excelente, por lo que el modelo desarrollado es una buena aproximación de lo que ocurre en la realidad.

7. LÍNEAS FUTURAS.

Como se ha podido comprobar, en este estudio se han obtenido unos resultados muy satisfactorios, aunque a lo largo de la redacción se han enumerado posibles mejoras para lograr un modelo numérico aún mejor.

De esta manera, para concluir este trabajo, se enumeran todos aquellos aspectos de la investigación que hay que seguir desarrollando en futuros estudios.

En primer lugar, hay que desarrollar un modelo numérico que sea capaz de reflejar el comportamiento elastoplástico de un sistema con dos materiales o uno formado únicamente por acero. En este estudio, se ha caracterizado el comportamiento de dichos sistemas exclusivamente en régimen elástico, pero es preciso ir un paso más allá, ya que tanto la reacción de la viga como el efecto producido por el aglomerado serán distintos en este nuevo escenario.

Además, hay que considerar la influencia que tiene en los resultados la rigidez de los apoyos de la viga, que ya se ha demostrado que es importante y no se puede despreciar. Por tanto, una posible propuesta es preparar varios escenarios con apoyos de diferente rigidez y analizar los resultados obtenidos en cada situación, para desarrollar un modelo en el que se pueda introducir la rigidez de los apoyos que se desee.

Por último, como ya se ha adelantado, es preciso seguir con la labor de caracterización del modelo BB.

Finalmente, una vez ejecutados todos estos estudios, ya se estaría en condiciones de desarrollar un modelo numérico a escala 1:1 de protección vial. Esto consiste en modelar un guardarraíl de dimensiones reales al que se le impacta una masa considerable. Con este modelo, sería posible evaluar la severidad de un impacto real con y sin aglomerado. De este modo, se alcanzaría el objetivo final: el desarrollo de un modelo numérico que permita estudiar las consecuencias de combinar el guardarraíl con un material viscoelástico reciclado, sin necesidad de reproducir dicho fenómeno en la vida real, lo que supondría una gran inversión económica.

8. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.

- [1] González-Vega, J., Castillo-López, G., Galindo-Moreno, J. M., Guerrero-Porras, S., & García-Sánchez, F. (2022). Experimental viscoelastic properties evaluation, under impact loads and large strain conditions, of coated & uncoated rubber from end-of-life tires. *Polymer Testing*, 107, 107468.
- [2] Sun, E. Q. (2006). Shear locking and hourglassing in MSC Nastran, ABAQUS, and ANSYS. In *Msc software users meeting* (pp. 1-9).
- [3] Henn, H. W. (1998). Crash tests and the head injury criterion. *Teaching mathematics and its applications*, 17(4), 162-170.
- [4] Galindo Moreno, J. M. (2019). Análisis numérico experimental del comportamiento de materiales viscoelásticos procedentes de neumáticos fuera de uso (Trabajo fin de grado). Universidad de Málaga.
- [5] Guerrero Porras, S. (2020). Calibración de las propiedades viscoelásticas de material reciclado de NFU a partir de ensayos de impacto (Trabajo fin de grado). Universidad de Málaga.
- [6] Vílchez Jiménez, D. (2021). Adaptación de la máquina de caída de dardo Instron CEAST-9350 a la realización de ensayos de impacto sobre especímenes estructurales de tamaño superior al nominal (Trabajo fin de grado). Universidad de Málaga.
- [7] ETRMA (2021). In Europe 95% of all End-of-Life Tyres were collected and treated in 2019.
- [8] Bergstrom, J. S. (2015). *Mechanics of solid polymers: theory and computational modeling*. William Andrew.
- [9] Guerrero Porras, S. (2023). Determinación experimental de las propiedades viscoelásticas homogeneizadas de un aglomerado realizado a partir de neumáticos reciclados (Trabajo fin de máster). Universidad de Málaga.
- [10] Explicit nonlinear analysis using MSC Nastran and Patran, *NAS126 Course Notes*. MSC Software.
- [11] Burgos de la Rosa, I., López-Taboada, C., Castillo-Lopez, G., Zabala, H., Aretxabaleta, L., & García-Sánchez, F. (2017). Experimental numerical correlation of the delamination of composite structures subjected to low speed impact.

- [12] Bergström, J. S., & Boyce, M. C. (1998). Constitutive modeling of the large strain time-dependent behavior of elastomers. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 46(5), 931-954.
- [13] LS-DYNA® Keyword user's manual. Volume II. Material models. 09/27/21 (r:14196). LS-DYNA R13. Livermore Software Technology (LST), an ANSYS company.
- [14] Instron. (2014). *Ceast 9350. Operating instructions* (3^a ed).
- [15] Flanagan, D. P., & Belytschko, T. J. I. J. F. N. M. I. E. (1981). A uniform strain hexahedron and quadrilateral with orthogonal hourglass control. *International journal for numerical methods in engineering*, 17(5), 679-706.
- [16] Asociación Española de Normalización y Certificación. (2020). *Materiales metálicos. Ensayo de tracción. Parte 1: Método de ensayo a temperatura ambiente (UNE-EN ISO 6892-1:2020)*.
- [17] Tabiei, A. L., Lawrence, C., & Fasanella, E. L. (2009). Validation of finite element crash test dummy models for predicting orion crew member injuries during a simulated vehicle landing. In *10th International LS-DYNA Users Conference* (No. E-16677).
- [18] Boag, R. (2016). Comparing predicted and measured accelerations from a simple drop test experiment. *14 LS-DYNA Forum Bamberg*.
- [19] LS-DYNA® Keyword user's manual. Volume I. 09/24/21 (r:14186). LS-DYNA R13. Livermore Software Technology (LST), an ANSYS company.
- [20] LS-DYNA® Keyword user's manual. Volume III. Multi-Physics Solvers 09/24/21 (r:14186). LS-DYNA R13. Livermore Software Technology (LST), an ANSYS company.
- [21] Bergström, J. S., & Boyce, M. C. (2000). Large strain time-dependent behavior of filled elastomers. *Mechanics of materials*, 32(11), 627-644.
- [22] Bergström, J. S., & Boyce, M. C. (2001). Constitutive modeling of the time-dependent and cyclic loading of elastomers and application to soft biological tissues. *Mechanics of materials*, 33(9), 523-530.

ANEXO 1. FICHA TÉCNICA DEL ACERO.

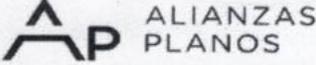
		CERTIFICADO DE CALIDAD QUALITY CERTIFICATE		Tipo de certificado / Certificate Type EN 10204 2.2
ALIANZAS EN ACEROS, S.L. Avda. Juan de Austria, S/N Puerto de Sagunto - Valencia				Código / Code
Según Norma / According to Standard UNE-EN 10.346	Bobina / Coil Nº 180676	Calidad / Quality CH.GAL.DX51.Z200MAC	Dimensiones / Dimensions 3.000 x 1.500 x 1,00	
Albarán / Delivery Note 30025	Cliente / Client 13550 HIERROS MONTILLA, S.L.U		Pedido / Order @Mª LOLA	
RESULTADOS / RESULTS				
Nº	Especificaciones / Specifications		Resultados / Results	
1	COMPOSICIÓN QUÍMICA / CHEMICAL COMPOSITION			
	CARBONO / CARBON (C%)		0,0300	
	MANGANESO / MANGANESE (MN%)		0,2500	
	FOSFORO / PHOSPHORUS (P%)		0,0110	
	AZUFRE / SULFUR (S%)		0,0090	
	ALUMINIO / ALUMINIUM (AL%)		0,0470	
	SILICIO / SILICON (SI%)		0,0060	
	TITANIO / TITANIUM (T%)		0,0030	
2	CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS / MECHANICAL CHARACTERISTICS			
	LIMITE ELÁSTICO/ELASTIC LIMIT (RE,N/MM2)		308,0000	
	CARGA DE ROTURA/BREAKING LOAD (RM,N/MM2)		390,0000	
	ALARGAMIENTO / ELONGATION.....:		35,0000	
	Nº COLADA / HEAT NUMBER		2B0524	
NUMERO BOBINA PROVEEDOR / SUPPLIER COIL NUMBER:			22508341	
BULTOS / PACKAGES				
Fleje/Strip		Paq/Pkg. 326014		
				
ALIANZAS EN ACEROS, S.L. Centro de Servicios Puerto de Sagunto C/. Juan de Austria, s/n. 46520 PUERTO SAGUNTO (Valencia)		Responsable de Calidad / Quality Manager DUSAN MASCHTOVSKY		
Fecha / Date 29/09/2022		CAL-04-02		

Figura A.1: Ficha técnica del acero.

ANEXO 2. ENSAYOS DE TRACCIÓN.

Probetas transversales.

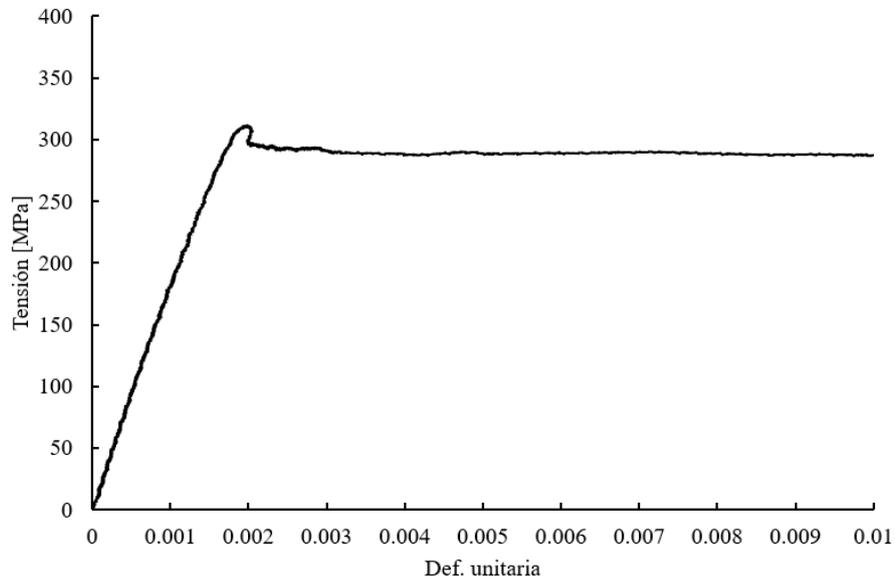


Figura A.2: Curva tensión-deformación de la probeta T01.

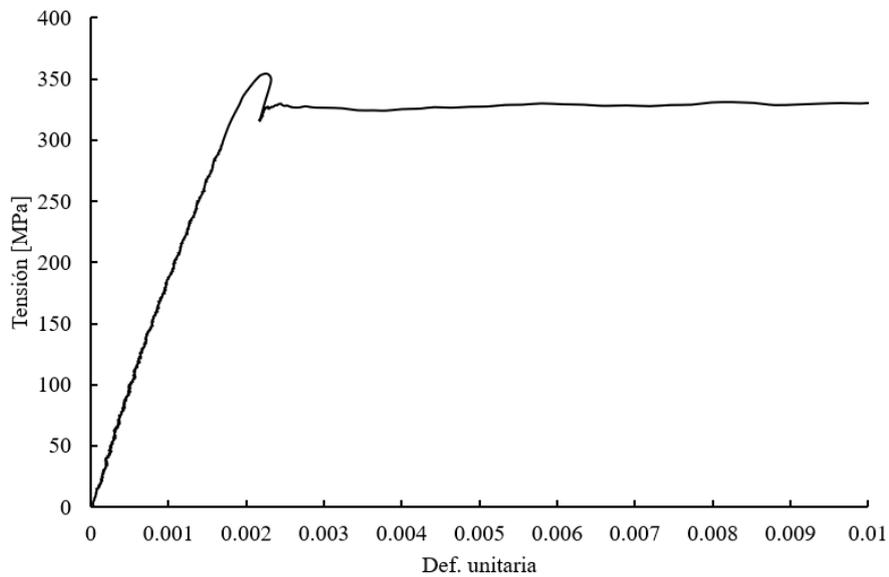


Figura A.3: Curva tensión-deformación de la probeta T02.

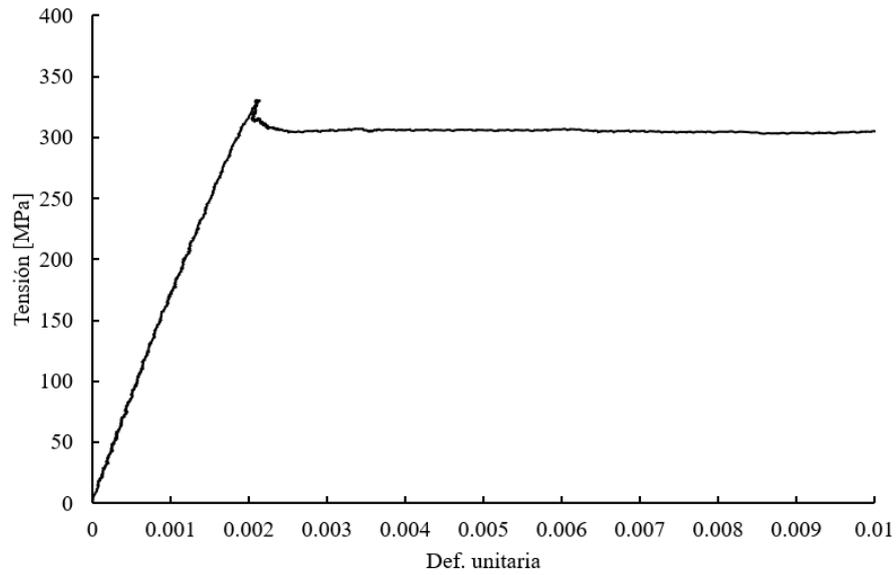


Figura A.4: Curva tensión-deformación de la probeta T03.

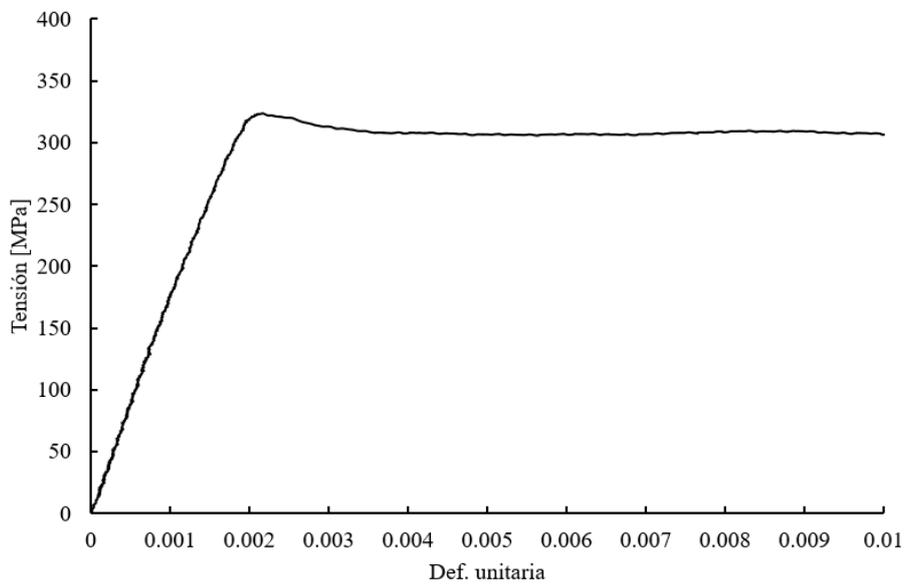


Figura A.5: Curva tensión-deformación de la probeta T04.

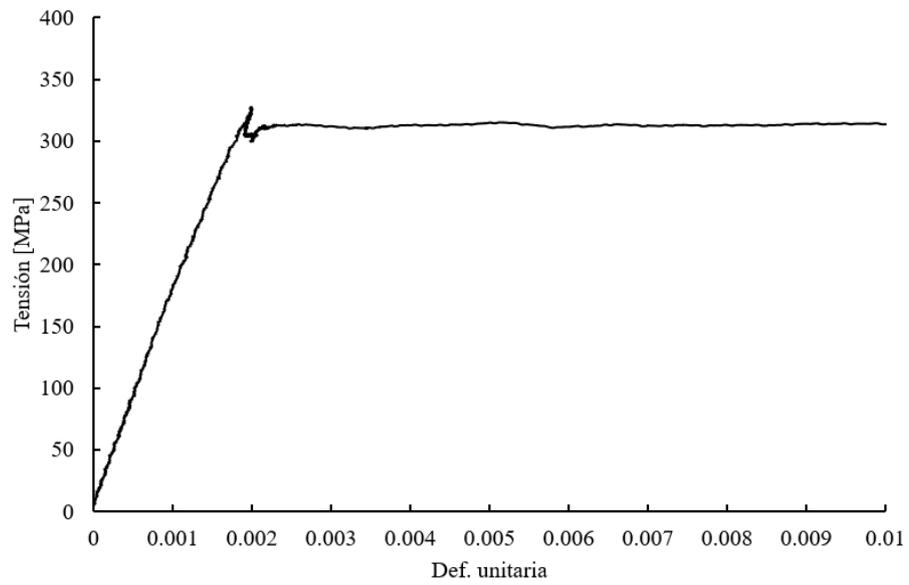


Figura A.6: Curva tensión-deformación de la probeta T05.

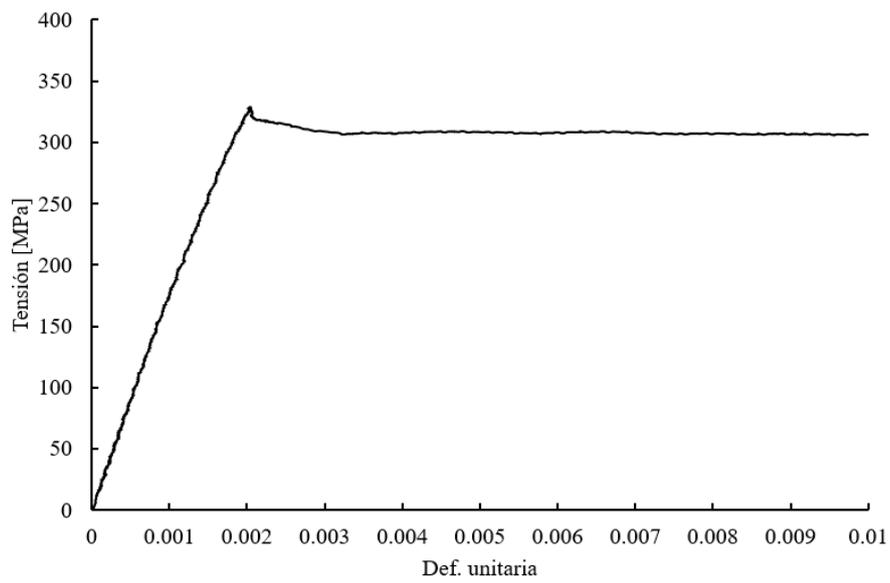


Figura A.7: Curva tensión-deformación de la probeta T06.

Probetas longitudinales.

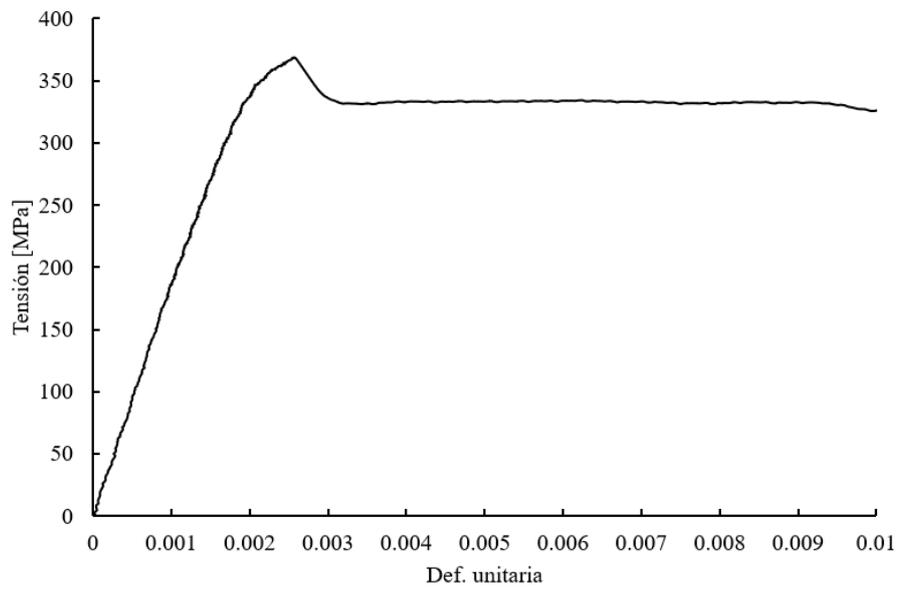


Figura A.8: Curva tensión-deformación de la probeta L01.

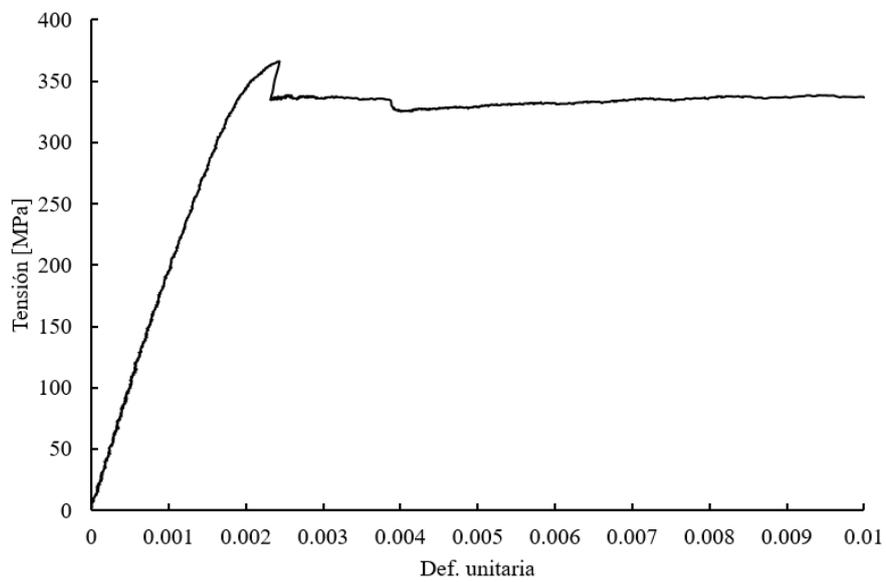


Figura A.9: Curva tensión-deformación de la probeta L02.

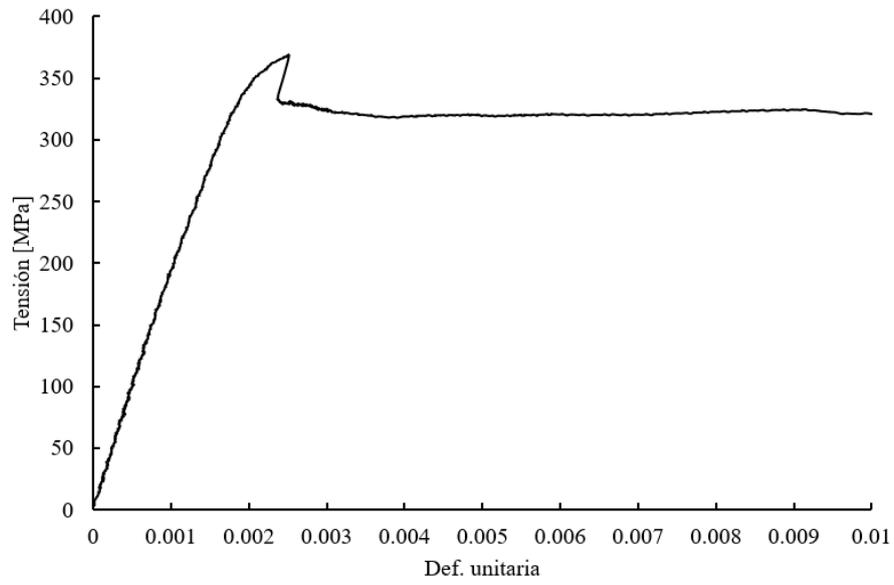


Figura A.10: Curva tensión-deformación de la probeta L03.

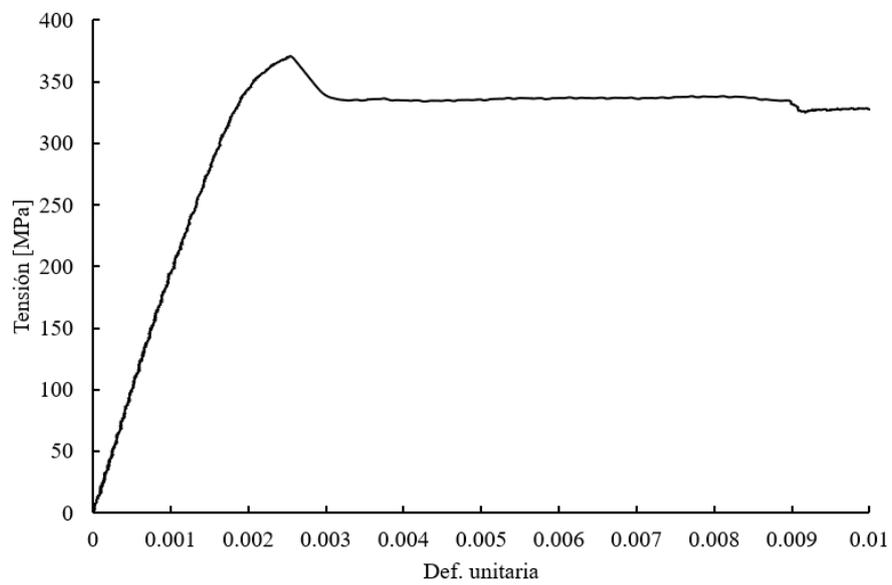


Figura A.11: Curva tensión-deformación de la probeta L04

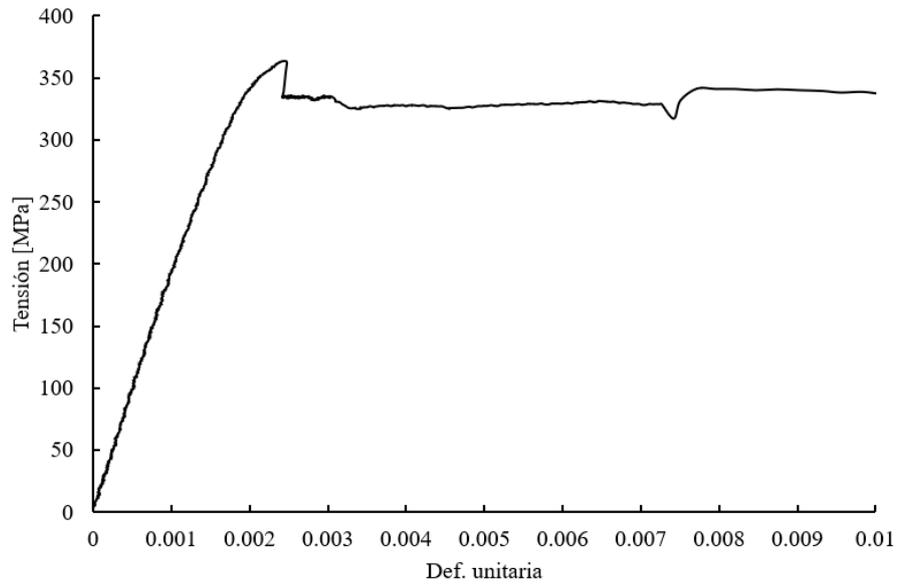


Figura A.12: Curva tensión-deformación de la probeta L05.

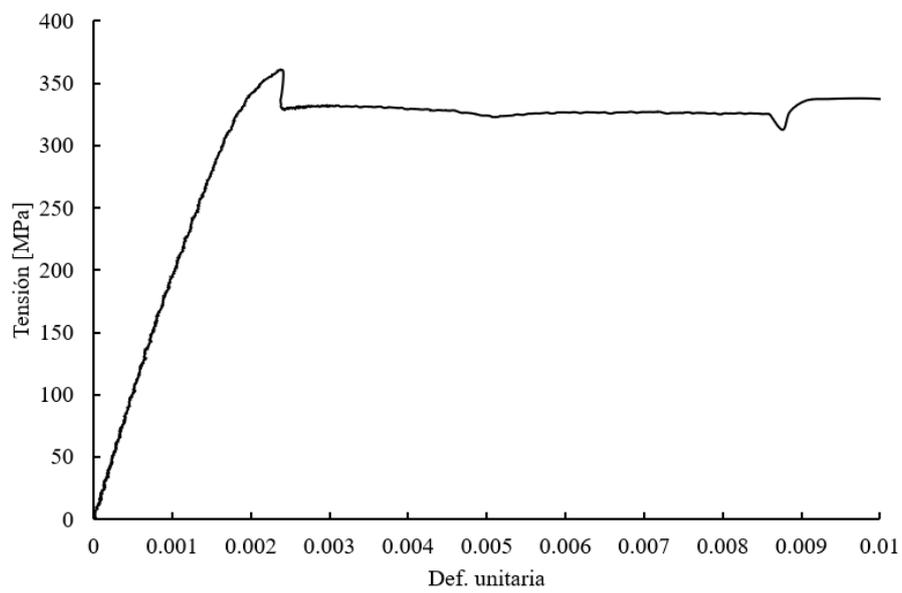


Figura A.13: Curva tensión-deformación de la probeta L06.

ANEXO 3. ENSAYO DE FLEXIÓN EN CUATRO PUNTOS.

Sección central.

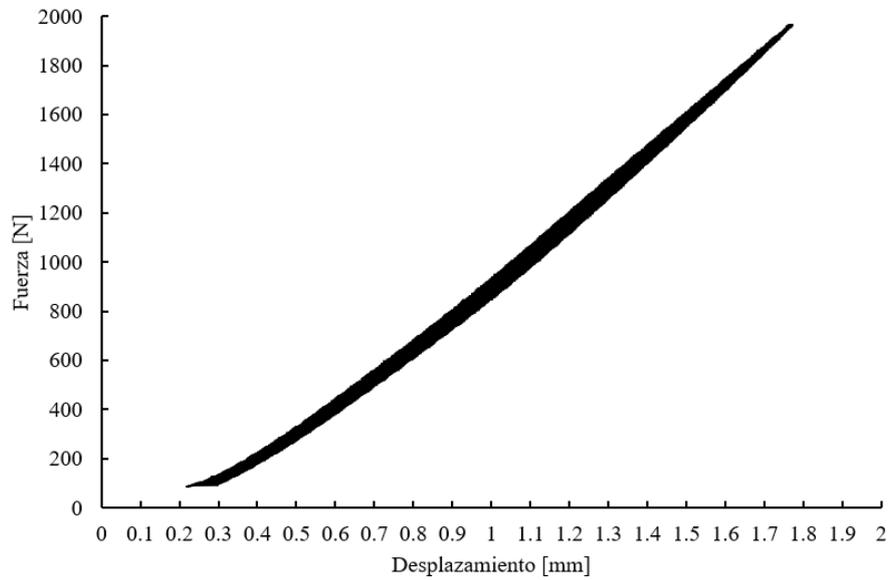


Figura A.14: Relación fuerza-desplazamiento en la sección central de la viga n° 4.

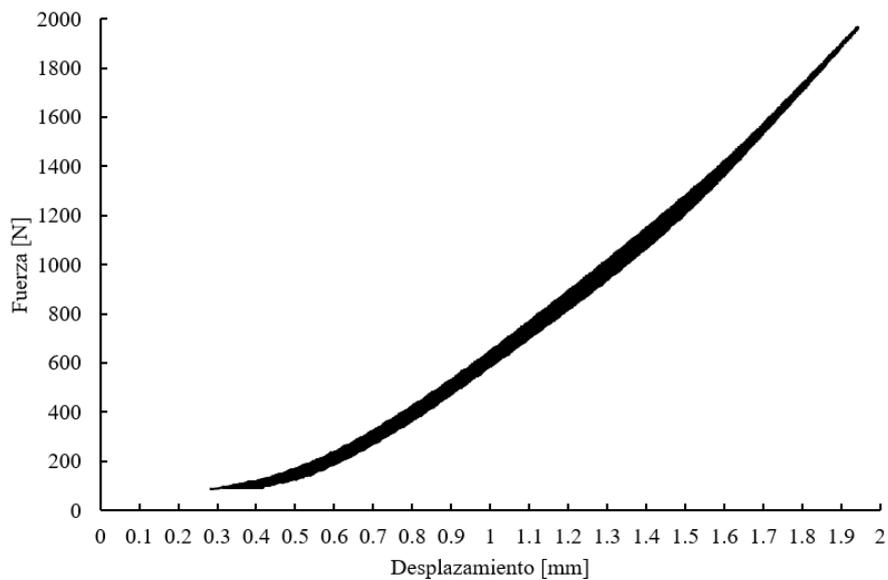


Figura A.15: Relación fuerza-desplazamiento en la sección central de la viga n° 5.

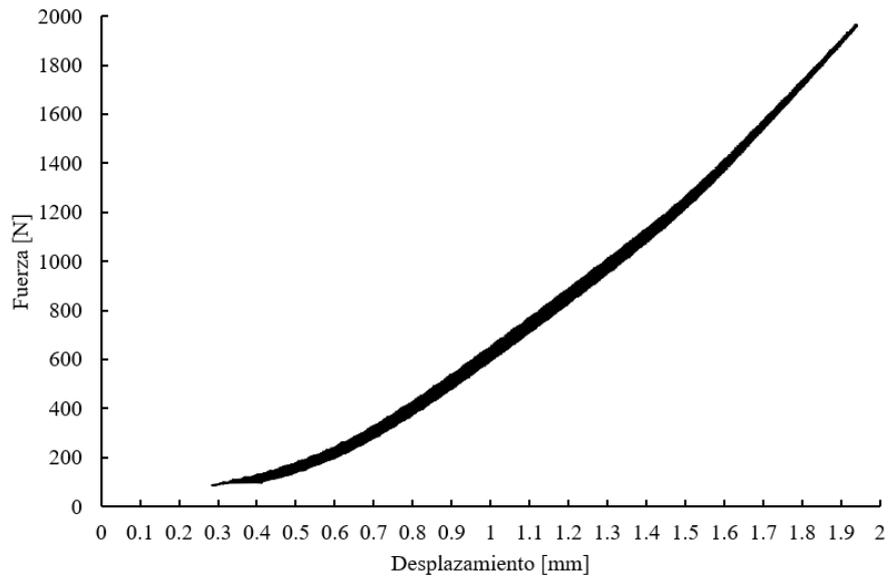


Figura A.16: Relación fuerza-desplazamiento en la sección central de la viga n° 6.

Sección bajo carga.

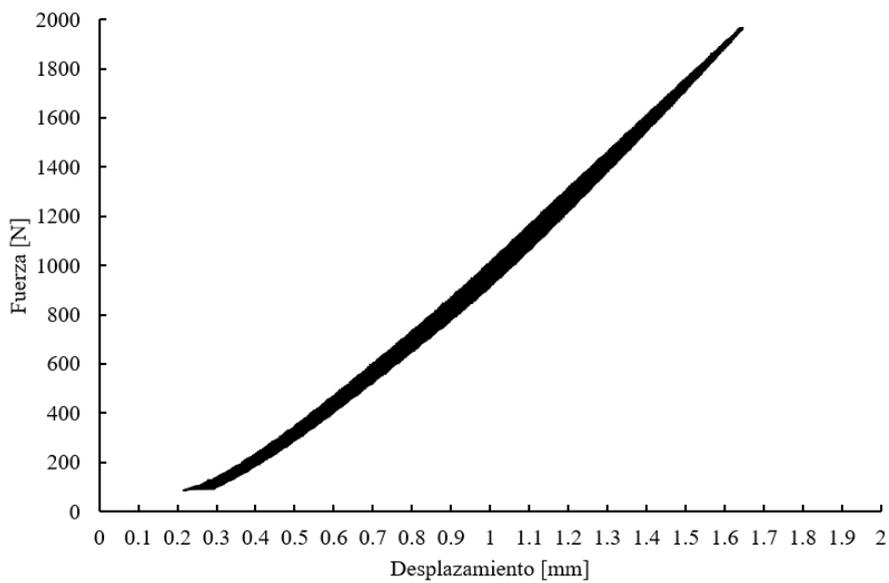


Figura A.17: Relación fuerza-desplazamiento promedio en las secciones bajo carga de la viga n° 4.

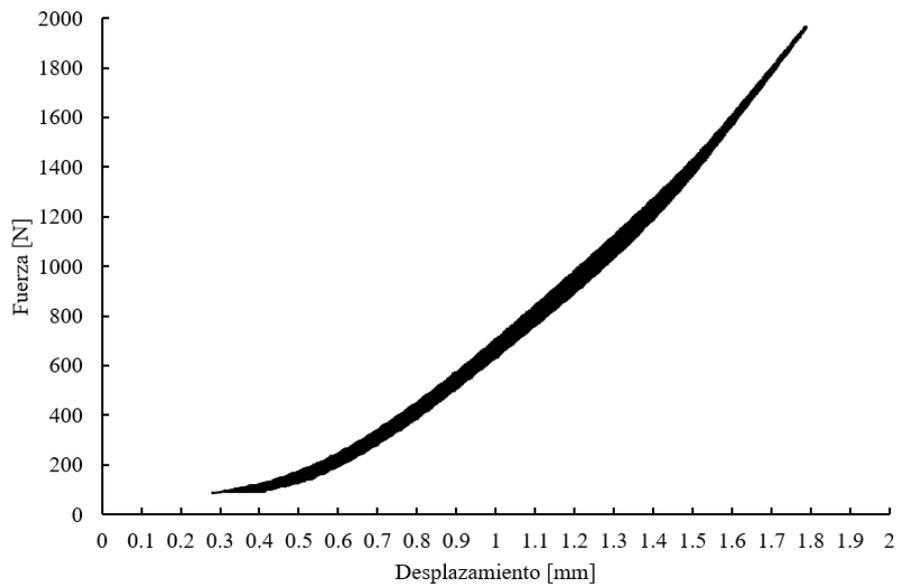


Figura A.18: Relación fuerza-desplazamiento promedio en las secciones bajo carga de la viga n° 5.

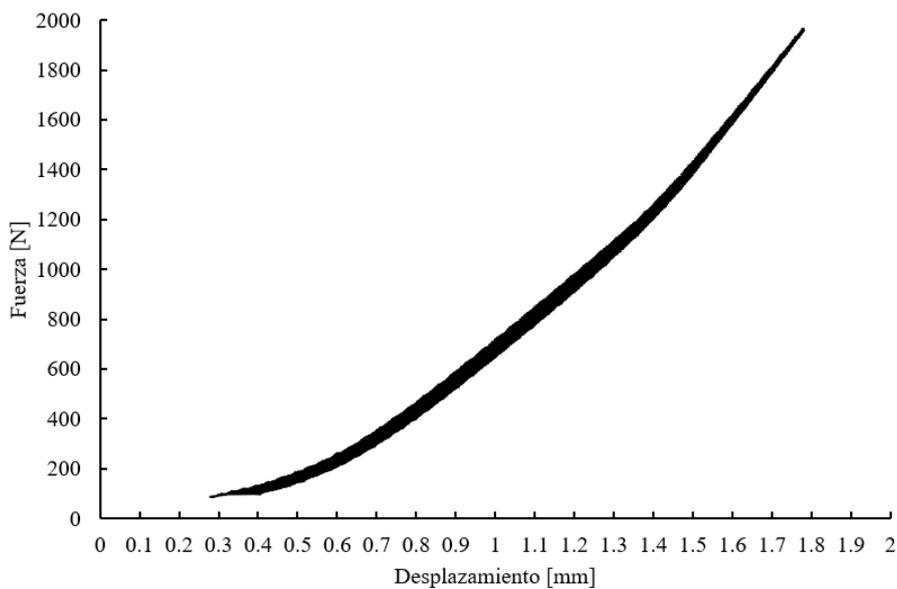


Figura A.19: Relación fuerza-desplazamiento promedio en las secciones bajo carga de la viga n° 6.

ANEXO 4. ENSAYOS DINÁMICOS.

Viga simple.

Viga nº 1.

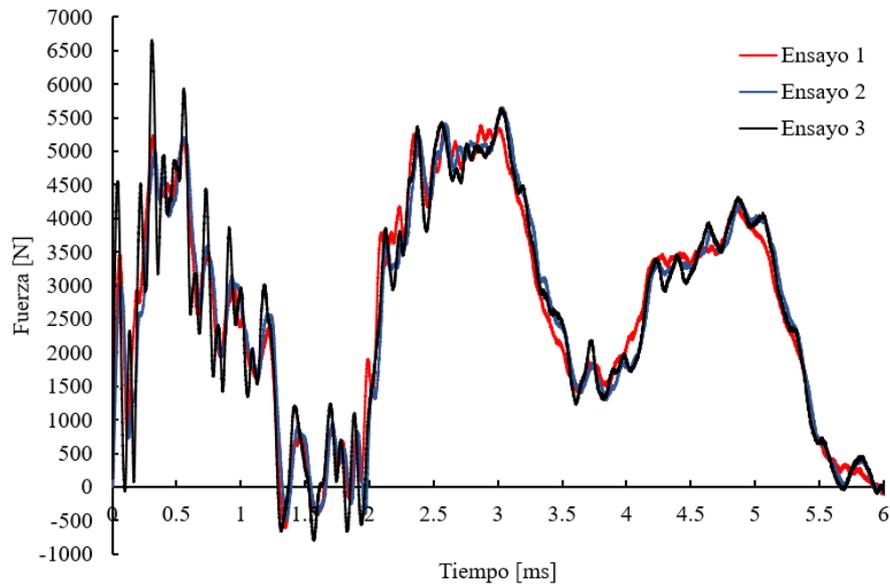


Figura A.20: Resultados del ensayo con la viga nº1 con una masa de 5.3 kg a 2 m/s.

Viga nº 2.

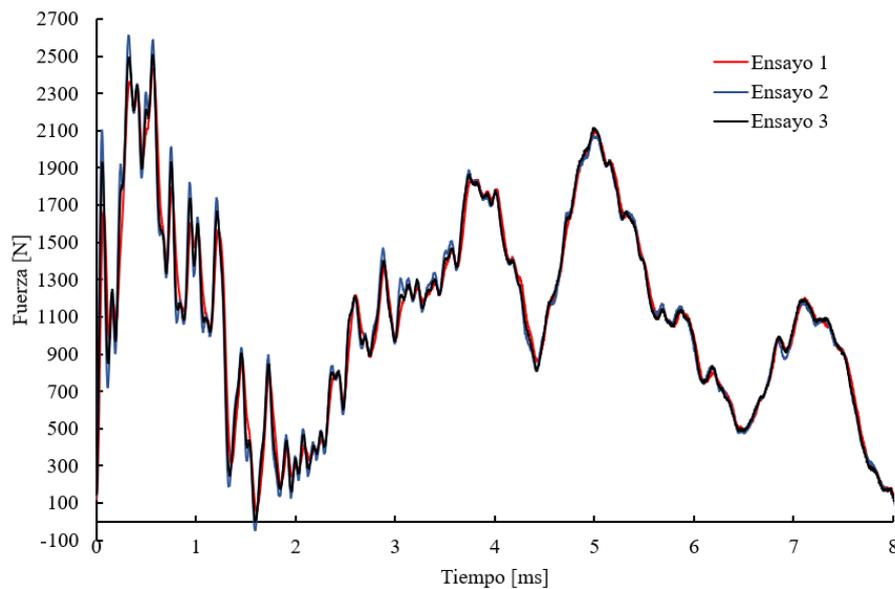


Figura A.21: Resultados del ensayo con la viga nº2 con una masa de 5.3 kg a 1 m/s.

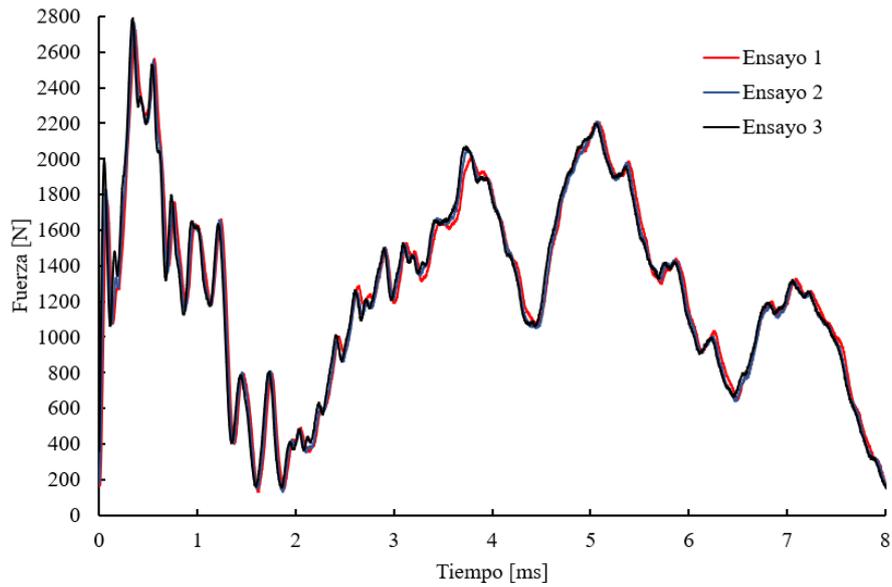


Figura A.22: Resultados del ensayo con la viga nº2 con una masa de 5.8 kg a 1 m/s.

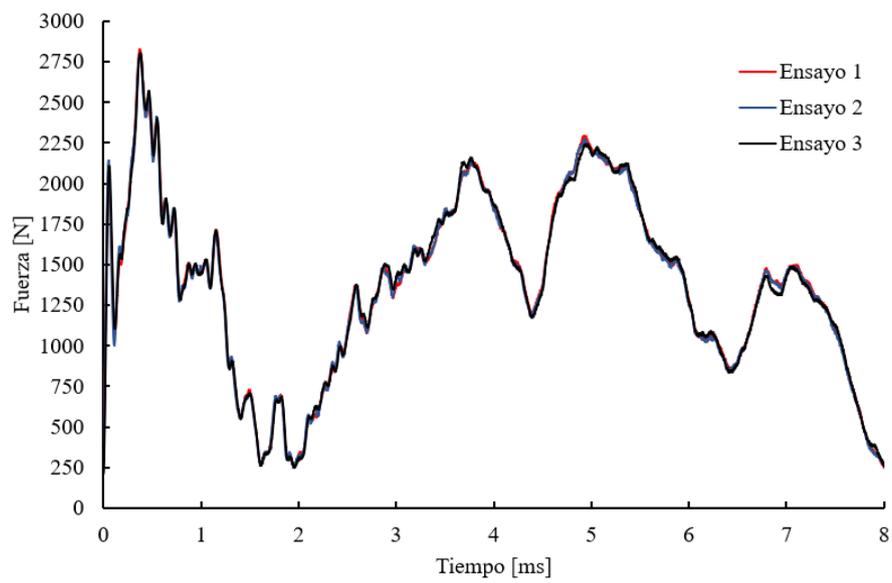


Figura A.23: Resultados del ensayo con la viga nº2 con una masa de 6.3 kg a 1 m/s.

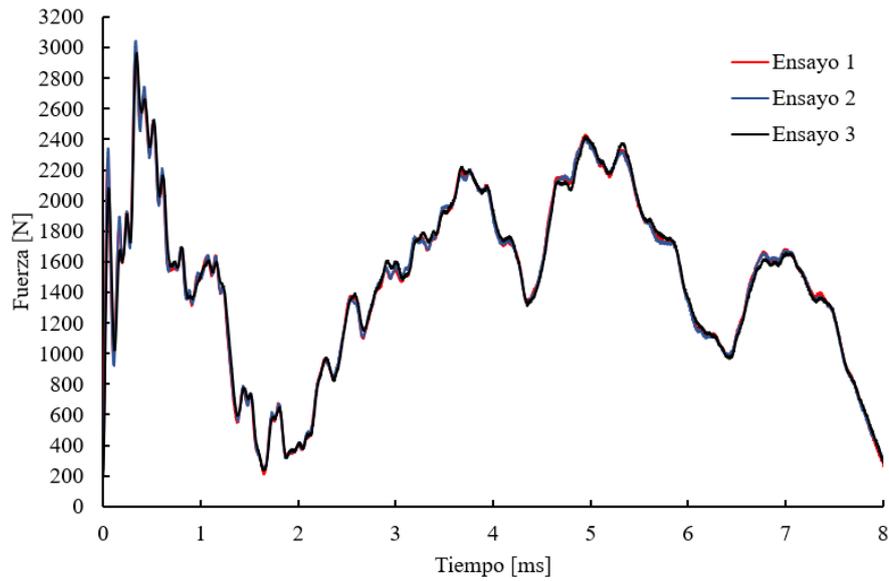


Figura A.24: Resultados del ensayo con la viga n^o2 con una masa de 6.8 kg a 1 m/s.

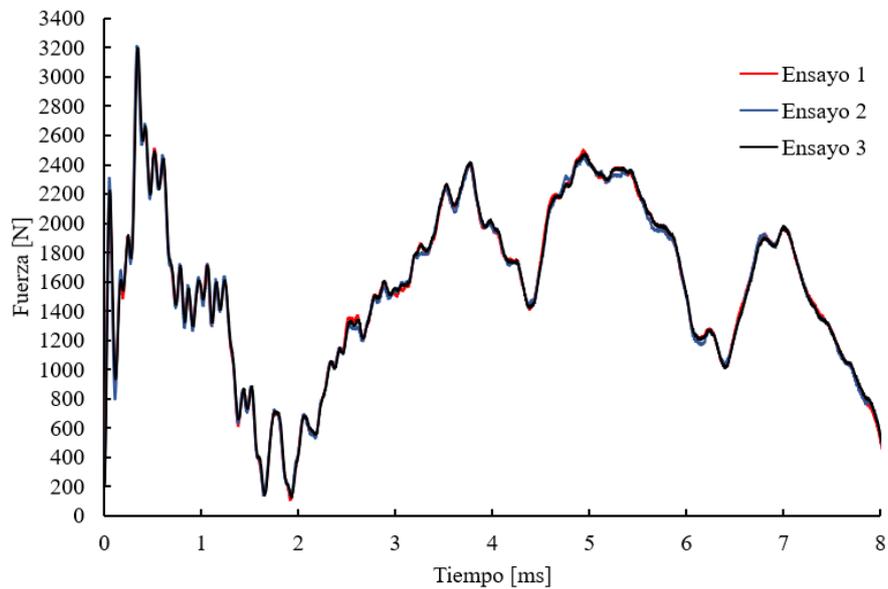


Figura A.25: Resultados del ensayo con la viga n^o2 con una masa de 7.3 kg a 1 m/s.

Viga nº 4.

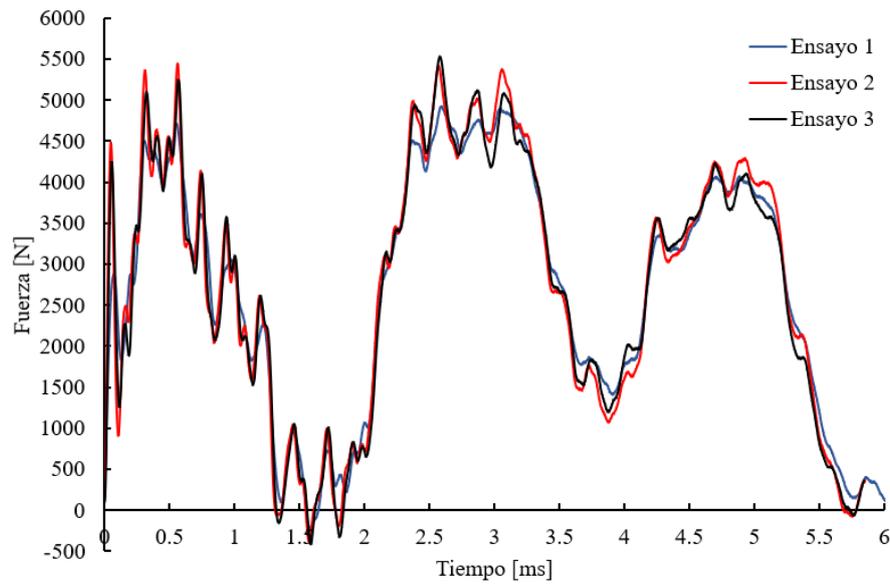


Figura A.26: Resultados del ensayo con la viga nº4 con una masa de 5.3 kg a 2 m/s.

Viga nº 5.

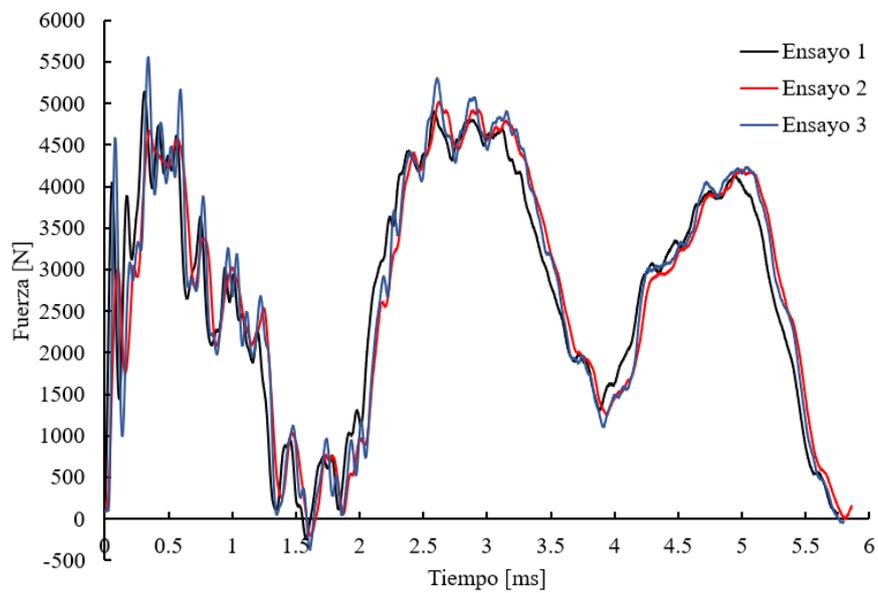


Figura A.27: Resultados del ensayo con la viga nº5 con una masa de 5.3 kg a 2 m/s.

Viga nº 6.

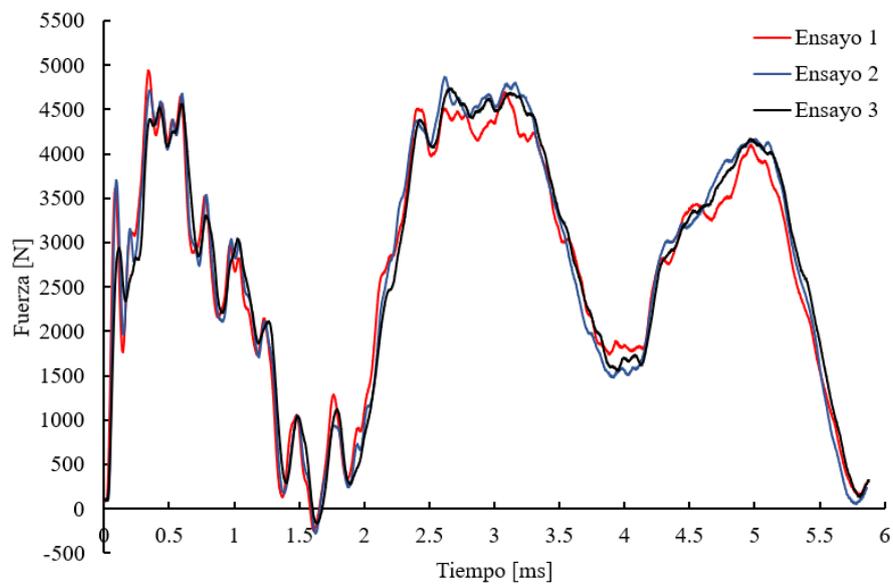


Figura A.28: Resultados del ensayo con la viga nº6 con una masa de 5.3 kg a 2 m/s.

Viga compuesta.

Viga nº 7.

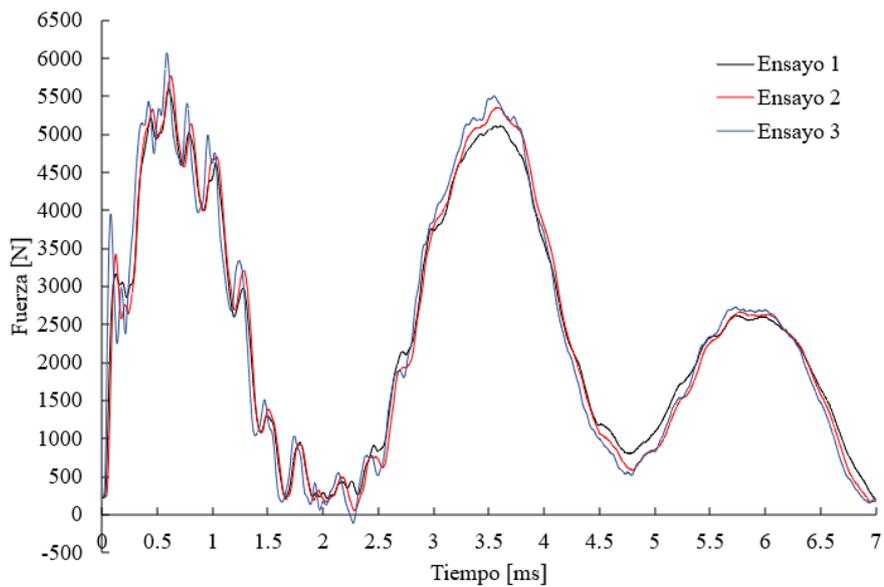


Figura A.29: Resultados del ensayo con la viga nº7 con una masa de 5.3 kg a 2 m/s.

ANEXO 5. RESULTADOS OBTENIDOS CON EL MODELO DE ELEMENTOS TIPO LÁMINA.

Hasta ahora, todo lo que se ha abordado en este trabajo ha sido referido a un modelo con elementos sólidos. Otra posibilidad que ofrece LS Dyna® es trabajar con elementos tipo *shell* o lámina. En la figura A.30 se pone de manifiesto la diferencia en la definición entre ambos tipos de elementos.

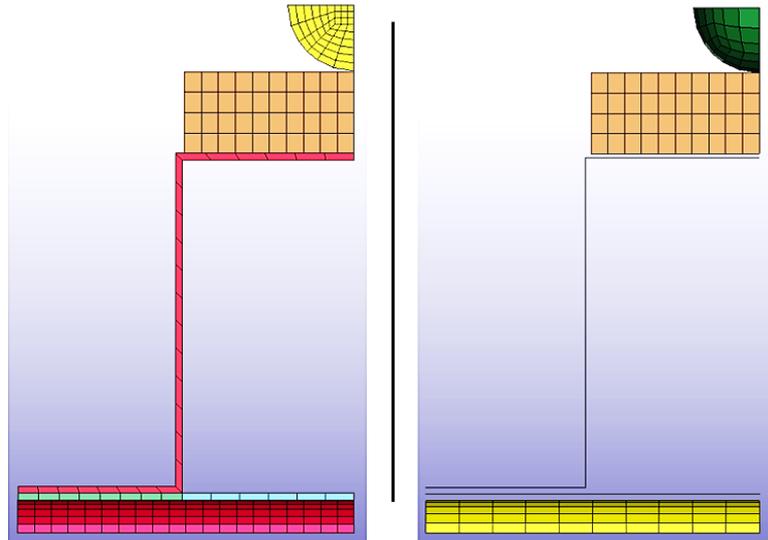


Figura A.30: Comparación entre un modelo sólido (izquierda) y un modelo lámina (derecha).

Una vez configurado este nuevo modelo lámina, para el que se han empleado elementos parabólicos con el mismo tamaño que se ha obtenido para el modelo sólido, se ha ejecutado el cálculo y se han obtenido los resultados reflejados en la figura A.31, para un impacto a 2 m/s y una masa del impactor de 5.3 kg.

A la vista de los resultados obtenidos, se puede concluir que el modelo tipo lámina no es una buena aproximación, ya que su duración es superior a la del impacto real, y los picos son más numerosos y alcanzan valores mayores.

Por tanto, este modelo queda descartado, siendo por tanto el mejor modelo aquél ejecutado con elementos sólidos.

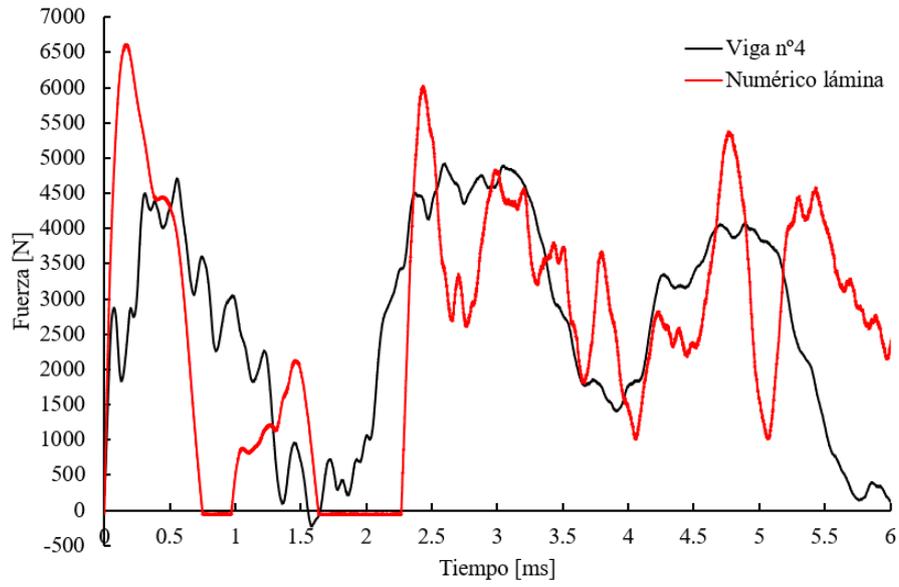


Figura A.31: Comparación de los resultados experimentales y numéricos obtenidos con un modelo tipo lámina.