



Universidad
Carlos III de Madrid

Departamento de Mecánica de Medios Continuos y
Teoría de Estructuras

PROYECTO FIN DE CARRERA

COMPORTAMIENTO FRENTE A IMPACTO DE ELEMENTOS TUBULARES DE SECCIÓN CIRCULAR

Autor: José Ignacio Crespo Hernández

Tutor: Dr. Dña. Shirley Kalamis García Castillo

Leganés, Octubre de 2010

Título: COMPORTAMIENTO FRENTE A IMPACTO DE ELEMENTOS
TUBULARES DE SECCIÓN CIRCULAR

Autor: José Ignacio Crespo Hernández

Director: Shirley Kalamis García Castillo

EL TRIBUNAL

Presidente: _____

Vocal: _____

Secretario: _____

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día __ de _____
de 20__ en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de
Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

A mis padres

Agradecimientos

Agradezco a mi Tutora de Proyecto, Shirley Kalamis García Castillo, la oportunidad que me ha dado para realizar este proyecto, y a mi familia, a mi novia y a mis amigos, por su apoyo y comprensión durante todo este tiempo.

Al profesor Enrique Barbero Pozuelo, por su asesoramiento, y a los técnicos de laboratorio por su colaboración a la hora de realizar los ensayos.

Resumen

El presente documento tiene el cometido de estudiar el comportamiento frente a impacto de elementos tubulares de fibra de carbono, dada su importancia para la aplicación en la industria automovilística como sustituto de las tradicionales barras de protección lateral de impacto de acero u otros materiales metálicos.

Con ello se consigue una reducción de peso del conjunto del vehículo, al sustituir materiales estructurales metálicos por otros de material compuesto, que mantienen la rigidez necesaria para la protección del vehículo, y consiguen hasta un 30% de ahorro de peso.

Para evaluar el comportamiento frente a impacto de estos elementos estructurales, se realizaron ensayos de flexión dinámica en tres puntos, y para evaluar las propiedades residuales, se realizaron ensayos de flexión estática en tres puntos.

A partir de estos ensayos se analizan diversas magnitudes como velocidades de impacto, carga soportada por los tubos, desplazamientos incurridos, tiempos de impacto, energías de impacto y energía absorbida por el material.

Queda demostrado al final, que una de las propiedades más ventajosas de los tubos de fibra de carbono frente a los metálicos, es su gran capacidad de absorción de energía en los impactos dinámicos, a parte de su baja densidad específica.

Palabras clave: Ensayo de flexión en tres puntos, ensayos de impacto, ensayos BAI, elementos tubulares, materiales compuestos, deslaminación.

Abstract

This document is mandated to study the impact behavior of tubular carbon fiber, given its importance for the application in the automotive industry as a substitute for traditional side-door impact beams of steel or other metallic materials.

This achieves a reduction in overall vehicle weight by replacing metal and other structural materials made of composite material, which maintain the strength necessary for the protection of the vehicle, and get up to 30% weight savings.

To evaluate the impact behavior of these structural elements were made three points dynamic bending tests, and to evaluate the residual properties were performed three points static bending tests.

From these tests, it explores a range of magnitudes like velocities of impact load on the tubes, strain incurred, time of impact, energy of impact and energy absorbed by the material.

Demonstrated at the end that one of the most advantageous properties of carbon fiber tubes to the metal is its great capacity to absorb energy in the dynamic impacts, apart from its low specific density.

Keywords: Three-Point Bending tests, impact testing, Beam After Impact, tubular elements, composite materials, delamination.

Índice general

1.	Introducción y objetivos.....	1
1.1	Introducción.....	1
1.2	Objetivos.....	1
1.3	Medios empleados	2
1.4	Estructura de la memoria.....	3
2.	Antecedentes	5
2.1	Introducción a los Materiales Compuestos.....	5
2.2	Materiales compuestos de fibra de carbono	7
2.2.1	Estructura y propiedades	8
2.3	Elementos tubulares de material compuesto	9
2.3.1	Ensayo de flexión de tres puntos.....	11
2.3.2	Parámetros de diseño.....	14
2.3.3	Fabricación de los elementos tubulares.....	21
2.3.4	Estudio estático	22
2.3.5	Estudios dinámicos.....	25
2.3.6	Análisis de elementos finitos	28
2.4	Propagación de las grietas en elementos tubulares.....	33
2.4.1	Ensayo Cuasi-estático de barras de sección rectangular	35
2.4.2	Análisis de los elementos tubulares mediante elementos finitos	39
2.4.3	Comparación de resultados	41
3.	Diseño del útil para ensayos de flexión de tres puntos para estructuras tubulares de sección circular.....	46
3.1	Requisitos del ensayo	47
3.2	Diseño de los útiles.....	49
4.	Procedimiento experimental.....	52

4.1	Introducción.....	52
4.2	Muestras de ensayos	53
4.3	Ensayos de flexión dinámica en tres puntos.....	54
4.3.1	Procedimiento experimental.....	55
4.3.2	Procesamiento de datos	55
4.3.3	Depurado de datos.....	62
4.4	Ensayos de resistencia residual a flexión	63
4.4.1	Procedimiento experimental.....	63
4.4.2	Tratamiento de datos	65
5.	Resultados	67
5.1	Ensayos de impacto	68
5.2	Ensayos de resistencia residual	71
6.	Conclusiones	77
6.1	Ensayos de impacto	77
6.2	Ensayos de resistencia residual	78
6.3	Consideraciones finales	78
6.4	Trabajos futuros.....	79
7.	Referencias.....	81
	Anexos.....	83

Índice de figuras

Figura 2.1 Tela de fibra de carbono [3].....	7
Figura 2.2 Filamento de carbono de 6 μm de diámetro (el menos grueso), comparado con un cabello humano [2].....	8
Figura 2.3 Esquema del ensayo de flexión simple [4].	12
Figura 2.4 Esquema de la Torre de Caída [5].	13
Figura 2.5 Los perfiles de tensiones en una viga en flexión. (a): elástico lineal, (b): totalmente de plástico [4].	13
Figura 2.6 Áreas sombreadas cuya eliminación permite mejorar la señal [5].	13
Figura 2.7 Respuesta del ensayo usando distintas configuraciones de las barras (ratio de deformación= 100 s^{-1}) [5].....	14
Figura 2.8 Ubicación de la barra lateral de impacto en la puerta del Renault Twingo [7].	15
Figura 2.9 Barra unida rígidamente [7].....	16
Figura 2.10 Restricciones geométricas para el modelo de puerta del Renault Twingo [7]	16
Figura 2.11 Esquema del ensayo de la barra de impacto en el laboratorio [7].	17
Figura 2.12 Barra de impacto lateral con las condiciones de contorno: (a) lado frontal y (b) lado posterior [7].	17
Figura 2.13 Dimensiones de la barra de impacto lateral [7].	18
Figura 2.14 Forma y disposición de las barras de protección lateral en turismos [6].....	18
Figura 2.15 Curvas fuerza-desplazamiento de las barras de protección de impacto de material compuesto según la secuencia de apilamiento de las fibras [6].....	20
Figura 2.16 Formas variadas de sección transversal de las barras de material compuesto [6].	20
Figura 2.17 Diagrama esquemático de la secuencia de fabricación para las barras de material compuesto [6].....	21
Figura 2.18 Diagrama de los métodos de fabricación para barras de protección de impacto de sección cuadrada, con refuerzo vertical y para vigas tipo I [6].	22
Figura 2.19 Utillaje del ensayo de flexión estático de tres puntos [6].	22
Figura 2.20 Capacidad de carga estática de las barras de protección de secuencia $[0_3^{\circ}/90^{\circ}]_{nT}$ para ratios del 50 y el 70% del peso de la barra de acero. 1, sección circular; 2, sección cuadrada; 3, sección cuadrada con refuerzo vertical; 4, sección tipo I [6].....	23
Figura 2.21 Deformada de la barra de impacto [6].	24

Figura 2.22 Comparativa entre los resultados de los ensayos estáticos, y el análisis de elementos finitos. (a) Sección circular, (b) sección cuadrada; (c) sección cuadrada con refuerzo vertical; (d) sección tipo I [6].....	24
Figura 2.23 Dibujo esquemático de la máquina de ensayos dinámicos con cilindros neumáticos [6].....	25
Figura 2.24 Señal de salida de los sensores fotoeléctricos [6].....	26
Figura 2.25 Resultados de energía dinámica absorbida en función de la temperatura para barras de acero de alta resistencia y material compuesto [6].....	27
Figura 2.26 Curvas tensión-deformación para el acero y el compuesto Twintex [7].	28
Figura 2.27 Restricciones en la barra: (a) rígida y (b) elástica [7].....	29
Figura 2.28 Desplazamientos máximos y distribuciones de tensión para la barra con restricción rígida: (a) acero, (b) material compuesto; y para la barra con restricción elástica: (c) acero y (d) material compuesto [7].....	31
Figura 2.29 Energía de deformación [7].	32
Figura 2.30 Curvas de carga axial frente al desplazamiento [7].....	32
Figura 2.31 Barra de material compuesto pultrusionada montada en un ensayo cuasiestático [9].....	35
Figura 2.32 Condición de sujeción en el extremo de la barra [9].	36
Figura 2.33 Barra la final de la fase rígida [9].	37
Figura 2.34 Acumulación del daño en las esquinas inferiores de la sección transversal en la zona de impacto [9].	37
Figura 2.35 Agrietamiento [9].....	38
Figura 2.36 Agrietamiento continuo y deterioro de las paredes verticales [9].	38
Figura 2.37 Fallo de la pared horizontal inferior [9].....	39
Figura 2.38 Fallo completo de la barra [9].....	40
Figura 2.39 Mallado de elementos finitos [10].	41
Figura 2.40 Fuerza del percutor frente a desplazamiento para $v= 5 \text{ cm/s}$ [9].....	42
Figura 2.41 Fuerza de la célula de carga frente a desplazamiento para $v= 50 \text{ cm/s}$ [9]. .	42
Figura 2.42 Fuerza del percutor frente a desplazamiento para $v=100 \text{ cm/s}$ [9].....	43
Figura 2.43 Fuerza del percutor frente a desplazamiento para $v= 500 \text{ cm/s}$ [9].....	44
Figura 3.1 Detalle del percutor de impacto para los ensayos dinámicos y estáticos.....	47
Figura 3.2 Cámara donde se aloja el utillaje y la probeta en la torre de caída.....	48
Figura 3.3 Útil de sujeción para los ensayos dinámicos. (a) Útil inicial. (b) Útil modificado con taladros y las placas de fijación.....	49
Figura 3.4 Útil de sujeción para los ensayos estáticos. (a) Útil inicial. (b) Útil modificado con las placas de fijación.....	49
Figura 3.5 Plano de diseño del utillaje completo para los ensayos dinámicos. Cotas en mm.....	50
Figura 3.6 Planos de diseño del utillaje completo para los ensayos estáticos. Cotas en mm.....	51
Figura 4.1 Tubo de fibra de carbono utilizado para los ensayos.....	53
Figura 4.2 Vistas frontal y lateral de los tubos.....	53
Figura 4.3 Equipo utilizado en los ensayos dinámicos.	54
Figura 4.4 Cámara de grabación de alta velocidad para los ensayos en la Torre de Caída.	54
Figura 4.5 Programa PFV para el tratamiento de datos registrados con la cámara.....	55
Figura 4.6 Instante de máximo desplazamiento. Puntos superior e inferior.	56
Figura 4.7 Representación de la fuerza frente al desplazamiento con los datos obtenidos de la torre de caída, para el ensayo R15_3.....	57
Figura 4.8 Representación de la energía frente al tiempo para el ensayo de 15 Julios....	58

Figura 4.9 Representación de la fuerza frente al tiempo para el ensayo de 15 Julios.....	58
Figura 4.10 Variación de la aceleración en función del tiempo para el ensayo de 15 Julios.	59
Figura 4.11 Variación de la velocidad de impacto del percutor en función del tiempo en el ensayo de 15 J.	60
Figura 4.12 Curva desplazamiento versus tiempo en el ensayo de 15 Julios.	60
Figura 4.13 Representación de la fuerza del percutor en función del desplazamiento $x(t)$, en el ensayo de 15 Julios de energía de impacto.....	61
Figura 4.14 Energía frente al tiempo para el ensayo de 15 Julios.....	61
Figura 4.15 Comparación de los dos métodos de obtención de la energía absorbida mediante el programa Kaleida.	62
Figura 4.16 Ajuste de los datos a una función de media móvil de periodo 85.	62
Figura 4.17 Equipo utilizado en los ensayos estáticos.....	63
Figura 4.18 Ejemplo de salida de datos recogidos por el extensómetro.	64
Figura 4.19 Ejemplo de salida de datos recogidos por la Máquina de Ensayos Universal.	64
Figura 4.20 Curva de desplazamiento frente a tiempo con el extensómetro para la obtención del desplazamiento máximo.	65
Figura 5.1 Representación de la energía absorbida, hallada con la cámara y con los ficheros de la torre, en función de la energía de impacto de la cámara.	68
Figura 5.2 Representación del porcentaje de energía absorbida en función de la energía de impacto de la cámara.	69
Figura 5.3 Representación de los puntos de fuerza máxima obtenidos en cada ensayo, en función de la energía de impacto de la cámara.	70
Figura 5.4 Representación del desplazamiento de los puntos superior (contacto) e inferior, en función de la energía de impacto del ensayo.....	70
Figura 5.5 Representación del tiempo de impacto medio en cada ensayo según la energía de impacto.	71
Figura 5.6 Representación de la fuerza aplicada en función del desplazamiento, recogido por la Máquina y por el extensómetro en el ensayo con la probeta de control.	72
Figura 5.7 Representación de la fuerza del ensayo en función del desplazamiento, medido por la Máquina y por el sensor LVDT, para el ensayo de 15 Julios.	72
Figura 5.8 Representación de la fuerza del ensayo en función del desplazamiento, medido por la Máquina y por el sensor LVDT, para el ensayo de 20 Julios.	73
Figura 5.9 Representación de la fuerza del ensayo en función del desplazamiento, medido por la Máquina y por el sensor LVDT, para el ensayo de 25 Julios.	73
Figura 5.10 Representación de la fuerza del ensayo en función del desplazamiento, medido por la Máquina y por el sensor LVDT, para el ensayo de 30 Julios.	73
Figura 5.11 Representación de los puntos de fuerza máxima obtenidos en cada ensayo, en función de la energía de impacto.....	74
Figura 5.12 Capacidad de absorción de carga en función de la energía de impacto de la cámara.	75
Figura 5.13 Desplazamiento máximo medido con la Máquina de ensayos estáticos y con el extensómetro LVDT en función de la energía de impacto de la cámara.	76

Índice de tablas

Tabla 2.1 Propiedades de acero de alta resistencia y compuesto de fibra de vidrio-epoxi [6].	19
Tabla 2.2 Composición del acero AISI 4340 [6].	19
Tabla 2.3 Porcentajes de absorción de energía para las cuatro secciones de las barras de material compuesto [6].	27
Tabla 2.4 Propiedades mecánicas y físicas de los materiales usados en el análisis [8]. ..	29
Tabla 2.5 Comparación de los resultados de la simulación [7].	33
Tabla 2.6 Constantes elásticas del material compuesto usado en la simulación [9].	41

Capítulo 1

Introducción y objetivos

1.1 Introducción

El empleo de materiales compuestos, como ya ha ocurrido en otras industrias como la aeroespacial, supone un gran reto para la Ingeniería del diseño y de fabricación de los materiales, y permite a partir de su utilización en grandes series reducir costes, emisiones de gases a la atmósfera y lo más importante, reducir el consumo de combustible.

Esto se consigue con la consiguiente reducción de peso, al sustituir materiales estructurales metálicos por otros de material compuesto, que mantienen la rigidez necesaria para la protección del vehículo, y consiguen hasta un 30% de ahorro de peso.

El presente documento tiene el objetivo de estudiar el comportamiento frente a impacto de elementos tubulares de fibra de carbono, dada su importancia para la aplicación en la industria automovilística como sustituto de las tradicionales barras de protección lateral de impacto de acero u otros materiales metálicos.

1.2 Objetivos

El objetivo principal del proyecto es estudiar el comportamiento mecánico de elementos tubulares de sección circular sometidos a impactos de baja velocidad, para ver su aplicabilidad como barras de protección lateral de impacto en vehículos. La consecución del objetivo marcado se basará en la cumplimentación de los siguientes subobjetivos que se plantean a continuación:

- Preparación, adaptación y diseño de los útiles necesarios para llevar a cabo los ensayos requeridos para el estudio del comportamiento mecánico de los elementos tubulares de sección circular de material compuesto.
- Evaluación de la resistencia residual de las probetas de material compuesto a partir de los ensayos de flexión en tres puntos.
- Comparación entre las diversas técnicas de medición: datos recogidos por la Torre de Caída, y por la cámara, en los ensayos dinámicos; comparación entre el desplazamiento medido por la Máquina de Ensayos Universal y el medido por el extensómetro LVDT, en los ensayos estáticos.
- Comparación de tres métodos de cálculo de la energía absorbida en los ensayos dinámicos.

Para el desarrollo del proyecto de estudio del comportamiento mecánico de los elementos tubulares de fibra de carbono se han desarrollado las siguientes fases de forma cronológica:

- Primeramente se buscó información sobre trabajos ya realizados en el uso de materiales compuestos para componentes estructurales de protección en vehículos. Los ensayos que emplearon así como sus resultados obtenidos.
- Posteriormente se escogieron los ensayos que se precisarían para efectuar en el presente estudio: ensayos dinámicos de flexión de tres puntos y ensayos de evaluación de propiedades residuales.
- A partir de las probetas disponibles, se procedió a la determinación del utillaje necesario para los ensayos. Para ello se contó con algunos útiles ya existentes, empleados en otros ensayos. Se realizaron modificaciones en algunos casos y en otros casos se diseñaron y fabricaron nuevos elementos para la sujeción de las probetas.
- Se realizaron los ensayos de flexión de tres puntos en una Torre de Caída y en una Máquina de ensayos Universal, dentro de las instalaciones de la Universidad Carlos III de Madrid.
- Por último se procesaron los datos proporcionados por las máquinas de los ensayos, gracias a diversos programas informáticos, y se evaluaron los resultados experimentales.

1.3 Medios empleados

Para la elaboración del conjunto del proyecto se ha dispuesto de los medios facilitados por la Universidad, que se detallan a continuación:

- Documentos oficiales de estudios similares emitidos por otras universidades a nivel internacional.
- Laboratorio de ensayos con todo el equipo necesario: máquinas de ensayo, probetas, utillaje, etc.
- Asesoramiento por parte de la Tutora del proyecto y otros profesores, así como de los técnicos de los laboratorios.
- Equipos disponibles en las aulas informáticas.

Y también se ha contado con gran variedad de programas informáticos, para el diseño de presentación del utillaje, y fundamentalmente para el procesado de datos:

- Se utilizó el programa CATIA V5, primeramente para la elaboración de los planos de los útiles, así como para el diseño de las placas de fijación.

- Para el análisis de los ensayos dinámicos se contó con el software de la cámara de la torre de caída: el programa Photron Fastcam Viewer 2.4.
- Los datos suministrados por las máquinas de ensayos fueron ficheros EXCEL, programa con el que luego se procesaron los datos y elaboraron los resultados.
- Para la integración numérica de curvas se utilizó el programa Kaleidagraph 4.0.
- En la elaboración del presente documento ha usado el programa Microsoft Word y Adobe PDF en la edición del texto, y el Microsoft PowerPoint para la presentación del mismo.

1.4 Estructura de la memoria

Para facilitar la lectura de la memoria, se incluye a continuación un breve resumen de cada capítulo, comenzando por los antecedentes:

El capítulo de Antecedentes introduce primeramente al lector a los materiales compuestos, y más detalladamente, al empleado en las probetas de este estudio, la fibra de carbono. Después se presenta el estado del arte en cuanto a estudios con elementos tubulares de material compuesto para su utilización como barras de protección lateral. Se define a grandes rasgos el ensayo de flexión, en qué consiste, y que se consigue con él, y posteriormente se distingue entre estudios estáticos, dinámicos y computacionales mediante elementos finitos, realizados para evaluar el comportamiento frente a impacto de los elementos tubulares de material compuesto. Por último se estudia la propagación de las grietas en el material compuesto, con barras de sección cuadrada, y se analiza la tendencia de fallo del material.

En el Capítulo 3, referido al diseño del útil, se exponen las dificultades con las que se parten para realizar los ensayos con elementos de sección circular, como evitar el deslizamiento de los tubos sobre el apoyo del útil o el tener que asegurar el contacto único como uno de los principales requisitos del ensayo. Se emplea el utillaje disponible para otros experimentos en elementos tubulares de sección cuadrada, y se efectúan algunas modificaciones como taladros en las bases de los útiles para añadir unas placas de aluminio, diseñadas en este Proyecto, y posteriormente fabricadas en la Universidad. Asimismo para el posicionamiento de los útiles en ambas máquinas de ensayo se apoya en los planos del diseño CATIA de los mismos.

El procedimiento experimental llevado a cabo para realizar los ensayos con las probetas se describe en el Capítulo 4. En él, además, se explica el equipo con el que se cuenta para cada tipo de ensayo y la metodología de trabajo. Se efectuaron cuatro ensayos diferentes, uno para cada energía de impacto (15, 20, 25 y 30 Julios) y tipo de ensayo (ensayos dinámicos en Torre de Caída y posteriormente evaluación de las propiedades residuales en la Máquina Universal de Ensayos), con varias muestras de cada uno para contar con unos datos más fiables. También se efectúa un ensayo estático adicional, con probetas (tres muestras) denominadas “de control”, a diferencia de las anteriores, no ensayadas previamente. Al final del capítulo, se explica el procesamiento de los datos así como del método de limpieza de la señal utilizado para la posterior elaboración de los resultados.

En el Capítulo 5 se presenta el conjunto de los resultados en forma de gráficas. Se discuten y analizan los resultados, se justifican las gráficas obtenidas y se valora la concordancia de los datos entre un ensayo y otro, basándose en los estudios previos ya

realizados. Por una parte se representan los resultados referidos a los ensayos de comportamiento frente a impacto (ensayos dinámicos), y posteriormente los de resistencia residual (ensayos BAI). Entre otros valores se representarán la capacidad de absorción de energía de las barras, la fuerza y desplazamiento máximos obtenidos en cada ensayo, el porcentaje de fuerza resistida por las probetas en cada ensayo...

Por último, en el Capítulo 6, se resumen los resultados obtenidos en el estudio sobre el comportamiento frente a impacto de elementos tubulares de sección circular. Se concluye con la consecución de los objetivos principales y secundarios que se querían abordar y una valoración general del estudio realizado. También se citan unos posibles trabajos futuros que se pudieran desarrollar en la misma línea de investigación del presente proyecto

Se añaden un capítulo final con las referencias a las fuentes de información que se consultaron para la elaboración de la memoria y unos anexos, donde se incluyen todos los datos para la construcción de las gráficas de los Resultados y los planos de diseño de los útiles.

Capítulo 2

Antecedentes

Este capítulo expone el estado del arte en lo referente a ensayos de flexión en materiales compuestos. Primero se hará una introducción a los materiales compuestos y al material usado en el experimento: fibra de carbono. Se explica, también el funcionamiento de un ensayo de flexión de tres puntos, como el realizado para este proyecto, y se presentan estudios similares, anteriores al presente llevados a cabo en otras universidades con otros tipos de barras, materiales y condiciones. Se añaden los resultados extraídos de cada estudio.

2.1 Introducción a los Materiales Compuestos

En la ciencia de los materiales, reciben el nombre de materiales compuestos aquellos materiales que se forman por la unión de dos o más materiales para conseguir la combinación de propiedades que no es posible obtener en los materiales originales. Estos compuestos pueden seleccionarse para lograr combinaciones poco usuales de rigidez, resistencia, peso, rendimiento a alta temperatura, resistencia a la corrosión, dureza o conductividad. Los materiales compuestos cumplen las siguientes características [1]:

- Están formados de dos o más componentes distinguibles físicamente y separables mecánicamente.
- Presentan varias fases químicamente distintas, completamente insolubles entre sí y separadas por una interfase.
- Sus propiedades mecánicas son superiores a la simple suma de las propiedades de sus componentes (sinergia).
- No pertenecen a los materiales compuestos aquellos materiales polifásicos, como las aleaciones metálicas, en las que mediante un tratamiento térmico se cambian la composición de las fases presentes.

- Estos materiales nacen de la necesidad de obtener materiales que combinen las propiedades de los cerámicos, los plásticos y los metales. Por ejemplo en la industria del transporte son necesarios materiales ligeros, rígidos, resistentes al impacto y que resistan bien la corrosión y el desgaste, propiedades éstas que rara vez se dan juntas.

Dentro de la gran variedad de materiales compuestos se pueden distinguir las siguientes partes:

- Agente reforzante: es una fase de carácter discreto y su geometría es fundamental a la hora de definir las propiedades mecánicas del material.
- Matriz: tiene carácter continuo y es la responsable de las propiedades físicas y químicas. Transmite los esfuerzos al agente reforzante. También lo protege y da cohesión al material

Los materiales compuestos se pueden dividir en tres grandes grupos: materiales compuestos reforzados con partículas, materiales compuestos reforzados con fibras, y materiales compuestos estructurales. Para este proyecto sobre el comportamiento mecánico de elementos tubulares de fibra de carbono, se detalla el grupo de Materiales Compuestos reforzados con fibras.

Uno de los componentes de este tipo de material compuesto suele ser un agente reforzante, como una fibra fuerte: fibra de vidrio, cuarzo, kevlar, Dyneema o fibra de carbono, el cual proporciona al material su fuerza a tracción. El otro componente (llamado matriz), suele ser una resina como epoxi o poliéster, que envuelve y liga las fibras, transfiriendo la carga de las fibras rotas a las intactas, y entre las que no están alineadas con las líneas de tensión. También, a menos que la matriz elegida sea especialmente flexible, evita el pandeo de las fibras por compresión. Algunos compuestos utilizan un agregado en lugar de, o en adición a las fibras.

En términos de fuerza, las fibras (responsables de las propiedades mecánicas) sirven para resistir la tracción, la matriz (responsable de las propiedades físicas y químicas) para resistir las deformaciones, y todos los materiales presentes sirven para resistir la compresión, incluyendo cualquier agregado.

Los impactos o los esfuerzos cíclicos pueden causar que las fibras se separen de la matriz, lo que se llama deslaminación [5].

La gran mayoría de los materiales compuestos son creados artificialmente pero algunos, como la madera y el hueso, aparecen en la naturaleza.

En la actualidad, a pesar de haberse desarrollado materiales con unas propiedades excepcionales, las aplicaciones prácticas se ven reducidas por algunos factores que aumentan mucho su costo, como la dificultad de fabricación o la incompatibilidad entre materiales. Aún así constituyen un factor muy importante en el desarrollo de nuevos elementos estructurales en la industria aeronáutica y automotriz.

2.2 Materiales compuestos de fibra de carbono

La fibra de carbono es el desarrollo más reciente en el campo de los materiales compuestos siguiendo la idea de que uniendo fibras sintéticas con varias resinas, se pueden lograr materiales de baja densidad, muy resistentes y duraderos.

Se denomina fibra de carbono (Figura 2.1) a un compuesto no metálico de tipo polimérico, integrado por una fase que da forma a la pieza que se quiere fabricar. Es un material muy caro, de propiedades mecánicas elevadas y muy ligero. Al igual que la fibra de vidrio, es un caso común de metonimia, en el cual se le da al todo el nombre de una parte, en este caso el nombre de las fibras que lo refuerzan.

Al tratarse de un material compuesto, en la mayoría de los casos -aproximadamente un 75%- se utilizan polímeros termoestables como matriz. El polímero es habitualmente resina epoxi, de tipo termoestable aunque otros polímeros, como el poliéster o el viniléster también se usan como base para la fibra de carbono aunque están cayendo en desuso [2].



Figura 2.1 Tela de fibra de carbono [3].

Las propiedades principales de este material compuesto son:

- Elevada resistencia mecánica, con un módulo de elasticidad elevado.
- Baja densidad, en comparación con otros elementos, como por ejemplo, el acero.
- Elevado precio de producción.
- Resistencia a agentes externos.
- Gran capacidad de aislamiento térmico.
- Resistencia a las variaciones de temperatura, conservando su forma, sólo si se utiliza matriz termoestable.
- Buenas propiedades ignífugas.

Las razones del elevado precio de los materiales compuestos de fibra de carbono se debe a varios factores.

El refuerzo, fibra, es un polímero sintético que requiere un caro y largo proceso de producción. Este proceso se realiza a alta temperatura -entre 1100 y 2500 °C- en atmósfera de hidrógeno durante semanas, o incluso meses, dependiendo de la calidad que

se desee obtener, ya que pueden realizarse procesos para mejorar algunas de sus características una vez se ha obtenido la fibra.

Además, el uso de materiales termoestables dificulta el proceso de creación de la pieza final, ya que se requiere de un complejo utillaje especializado, como el horno autoclave. Tiene muchas aplicaciones en la industria aeronáutica y automovilística, al igual que en barcos y en bicicletas, donde sus propiedades mecánicas y ligereza son muy importantes. También se está haciendo cada vez más común en otros artículos de consumo como patines en línea, raquetas de tenis, ordenadores portátiles, trípodes y cañas de pesca e incluso en joyería.

2.2.1 Estructura y propiedades

Cada filamento de carbono es la unión de muchas miles de fibras de carbono. Un filamento es un fino tubo con un diámetro de 5–8 micrómetros y consiste mayoritariamente en carbono (ver Figura 2.2).

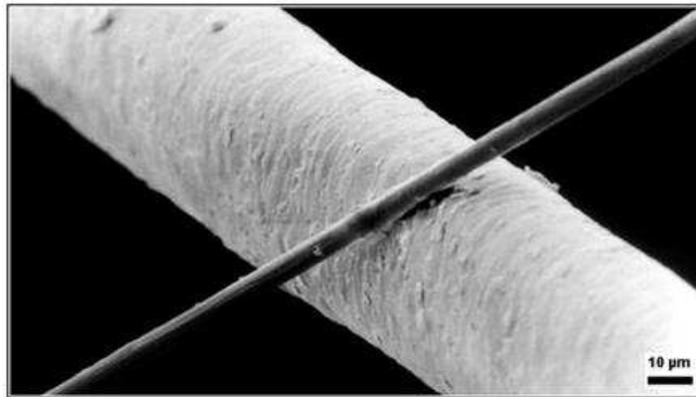


Figura 2.2 Filamento de carbono de 6 μm de diámetro (el menos grueso), comparado con un cabello humano [2].

La estructura atómica de la fibra de carbono es similar a la del grafito, consistente en láminas de átomos de carbono arreglados en un patrón regular hexagonal. La diferencia recae en la manera en que esas hojas se entrecruzan. El grafito es un material cristalino en donde las hojas se sitúan paralelamente unas a otras de manera regular. La unión química entre estas hojas es relativamente débil, dándole al grafito su blandura y brillo característico. La fibra de carbono es un material amorfo: las hojas de átomos de carbono están azarosamente foliadas, o apretadas. Esto integra a las hojas, previniendo su corrimiento entre capas e incrementando fuertemente su resistencia.

La densidad de la fibra de carbono es de 1.750 kg/m^3 . Es conductor eléctrico y de baja conductividad térmica. Al calentarse, un filamento de carbono se hace más grueso y corto. Las fibras de carbono son negras, pero recientemente existen fibras con otros colores.

Su densidad lineal (masa por unidad de longitud) se representa con la unidad $1 \text{ tex} = 1 \text{ g}/1000 \text{ m}$ o por el número de filamentos por yarda, en miles.

2.3 Elementos tubulares de material compuesto

Los materiales compuestos de fibra reforzada se han usado en la industria aeronáutica debido a su alta resistencia específica (resistencia/densidad) y por su alta rigidez específica (rigidez/densidad). También poseen una gran amortiguación de impacto. Como el precio de los materiales compuestos ha descendido, están siendo ahora ampliamente usados en herramientas para el deporte, herramientas para maquinaria, y en la estructura de automóviles. Informes de Estados Unidos y Canadá, ya previeron que los materiales compuestos y los plásticos serían ampliamente usados en parachoques, spoilers, componentes flexibles, adornos y las partes transparentes de los coches. También se han construido rotores para compresores de aire usando RTM (moldeo por transferencia de resina) para sustituir las partes metálicas de las mismas, las cuales son muy difíciles de mecanizar. Los materiales compuestos también han sido usados en robots industriales, en donde la rigidez es muy importante y al incrementarla en los brazos de los robots, aumenta el peso del cuerpo, lo que reduce la capacidad de carga. Por ello se han usado materiales compuestos en la estructura de los robots tipo SCARA o robots antropomorfos. En definitiva se han sustituido numerosas estructuras de metal por materiales compuestos para diversas aplicaciones.

La eficiencia del consumo de los combustibles fósiles y las emisiones de gases como el CO₂ de los automóviles son dos aspectos muy valorados hoy en día. La mejor forma para incrementar la eficiencia del consumo sin sacrificar la seguridad es empleando materiales compuestos de fibra reforzada en la estructura y chasis de los vehículos debido a su alta resistencia específica en comparación con los metales. Los compuestos de fibra de vidrio y fibras de aramida tienen muy buenas características de absorción de energía, por eso con un chasis hecho de esos compuestos proporcionaría a los vehículos un menor consumo de carburante y una reducción de las lesiones en caso de accidente.

Se estudia, en el caso de Seong Sik Cheon et al [6], que materiales compuestos como la fibra de vidrio reforzada, normalmente, tienen mayor capacidad de absorción de energía de impacto a bajas temperaturas comparado con los metales. Se realizan análisis estáticos para determinar la secuencia de apilamiento óptima de las fibras y el espesor transversal de las barras de protección, teniendo en cuenta el ahorro de peso comparado con el acero de alta resistencia.

Aunque la absorción de energía estática de las barras de material compuesto es pequeña, debido a que tienen baja elongación comparadas con los metales, su capacidad de absorción de energía dinámica es mucho mayor debido a la expulsión de las fibras que sucede en la deslaminación y a otros mecanismos de absorción de energía.

De forma general, se ha observado que la capacidad de absorción de energía dinámica de las barras de protección es más importante que la estática, por eso se usa un test de impacto neumático cuya velocidad de impacto es 48.28 km/h (30 mph). Se han desarrollado estudios para investigar el comportamiento dinámico de las barras de acero y de las de material compuesto. Con este test de impacto se investiga la capacidad de absorción de energía dinámica de los elementos tubulares a varias temperaturas, como la temperatura ambiente.

Los análisis de elementos finitos se emplean en los estudios sobre comportamientos mecánicos, para comparar las características simuladas de los elementos tubulares con los resultados experimentales. Se ha encontrado que los resultados de los análisis de elementos finitos mostraron un buen acuerdo con los resultados experimentales, a pesar de que se realizan varias aproximaciones en el análisis de elementos finitos.

En el estudio de barras de protección lateral de Seong Sik Cheon et ál [6], que requieren una gran capacidad de absorción de energía de impacto, se usan barras de fibra vidrio en matriz epoxi. Los parámetros de diseño que se tienen en cuenta para la fabricación de las barras de protección lateral son la secuencia de apilamiento de las fibras y el espesor transversal. También se estudian barras de distintas secciones transversales para ver como varía su resistencia al impacto. Primero se crean los moldes de material compuesto y luego se fabrica un prototipo de barra de impacto. Para el análisis de las barras de protección lateral se realiza el ensayo de flexión de tres puntos, en las barras de acero y de material compuesto.

Por otro lado, se analiza en este capítulo un estudio sobre la importante aplicación de los FRP (fibra reforzada en matriz plástica, del inglés Fiber Reinforced Plastics) en la industria del automóvil. Está realizado por S. Erzen et ál, para la Universidad de Ingeniería Mecánica de Maribor, Eslovenia. La importancia de este estudio radica en que el aplicar FRP en los componentes estructurales, repercute directamente sobre una reducción del peso de los vehículos y en consecuencia, también de las emisiones de gases. Un ejemplo para reducir el peso total del vehículo es un nuevo diseño de las barras de protección lateral, a partir de elementos tubulares construidos con Twintex (material compuesto de fibra de vidrio en matriz termoplástica) [7].

Los métodos de elementos finitos (FEM, del inglés Finite Element Method), también se usaron, en este estudio, para realizar análisis computacionales del comportamiento de las barras de impacto laterales sometidas a carga, con el propósito de determinar su capacidad de absorción de energía de impacto en relación con las tradicionales barras de impacto de acero. Se analizaron diferentes secuencias de apilamiento de barras de material compuesto con la intención de encontrar la mejor combinación de resistencia, rigidez, energía absorbida y reducción de peso.

Los análisis hechos por ordenador, en este estudio, mostraron que una adecuada secuencia de apilamiento en las barras de Twintex, permite una buena capacidad para soportar cargas y absorbe más energía de deformación que las equivalentes de acero.

La regulación de las emisiones de gases de los coches es un aspecto muy importante en la industria del automóvil. Éstas, tienen un impacto directo en el diseño final del vehículo, la tecnología empleada, y en consecuencia en la eficiencia de consumo de combustible. Para cumplir con la regulación existente, los ingenieros de vehículos tienen que: rediseñar el interior, reduciendo los espacios vacíos del vehículos; iniciar cambios tecnológicos que eliminen equipamiento o reduzcan la robustez de los mismos; o remplazar los materiales existentes por otros más ligeros, sin sacrificar la integridad estructural y la seguridad.

Un diseño óptimo de los vehículos y su rigidez juegan un rol vital en el diseño de las aplicaciones estructurales del coche, por eso estos aspectos están controlados en detalle, especialmente cuando se introducen nuevos materiales de baja densidad (por ejemplo aluminio o materiales compuestos poliméricos). Para cumplir el objetivo de los

ingenieros de cambiar elementos estructurales del vehículo por otros fabricados con materiales de baja densidad, éstos deben inicialmente estimar y evaluar un diseño óptimo de las partes estructurales que no sacrifique seguridad y rigidez.

El estudio de S. Erzen et ál [7], presenta la aplicación de la fibra de vidrio en matriz termoplástica, en particular el compuesto Twintex, para las barras de impacto lateral del coche de pasajeros Renault Twingo, Figura 2.8. Durante el corto período de tiempo de un choque real, los componentes de seguridad actuales de las barras de protección lateral fabricados en acero están sujetos a altas cargas y altas deformaciones. Por ello, su equivalente fabricada en materiales de bajo peso, debe ser diseñada de tal manera, que sea capaz de absorber más energía de deformación, y mantenga una buena rigidez y resistencia, teniendo bajo peso específico. Las fuerzas y aceleraciones ejercidas sobre el vehículo, en el momento de un choque, deben ser distribuidas sobre la estructura del vehículo de tal manera que los pasajeros, dentro de la “zona de seguridad”, se vean afectados lo mínimo posible. Con respecto a ello, las normas 70/156/EEC y la 96/27EC, del estándar europeo para seguridad de vehículos ECE-R 95, se deben tener en cuenta a la hora de diseñar las barras de impacto lateral.

Para el análisis estructural de las barras de impacto laterales, se usa el método de elementos finitos (FEM), que es el método computacional más usado en aplicaciones de diseño para la industria del automóvil. Se analizan rigidez, tensión y energía de deformación, teniendo en cuenta el comportamiento no lineal, y las grandes deformaciones, ya que la respuesta del elemento de seguridad no es directamente proporcional a la carga aplicada.

2.3.1 Ensayo de flexión de tres puntos

Como se ha visto, para evaluar el comportamiento frente a impacto de los elementos tubulares, para su posterior aplicación como barras de protección lateral, es preciso someterlos a ensayos de flexión. A continuación se hace una introducción a los ensayos mecánicos de flexión y más concretamente al ensayo de flexión de tres puntos.

Los ensayos mecánicos, se establecen para verificar principalmente propiedades como la dureza superficial, la resistencia a los diferentes esfuerzos que pueda estar sometido la probeta, el grado de acabado del mecanizado o la presencia de grietas internas en el material.

Existen dos tipos de ensayos según la forma de realizarlo. Los no destructivos, que no alteran ni modifican la forma inicial de las probetas, y los destructivos, como el ensayo de flexión, que producen daño o la rotura de la pieza sometida a ensayo.

Se denomina flexión al tipo de comportamiento que presenta un elemento estructural alargado en una dirección perpendicular a su eje longitudinal. El término "alargado" se aplica cuando una dimensión es significativamente mayor frente a las otras. Un caso típico son las vigas, las que están diseñadas para trabajar, predominantemente, por flexión. Igualmente, el concepto de flexión se extiende a elementos estructurales superficiales como placas o láminas.

El rasgo más destacado de un objeto sometido a flexión es que presenta una superficie de puntos llamada fibra neutra tal que la distancia a lo largo de cualquier curva contenida en

ella no varía con respecto al valor antes de la deformación. Cualquier esfuerzo que provoca flexión se denomina momento flector.

Las vigas o arcos, son elementos estructurales pensados para trabajar predominantemente en flexión. Geométricamente son prismas mecánicos cuya rigidez depende, entre otras cosas, del momento de inercia de la sección transversal de las vigas.

El ensayo de flexión se realiza para medir el comportamiento esfuerzo-deformación y la resistencia a flexión de los materiales. En la Figura 2.3 se muestra un esquema del ensayo de flexión simple.

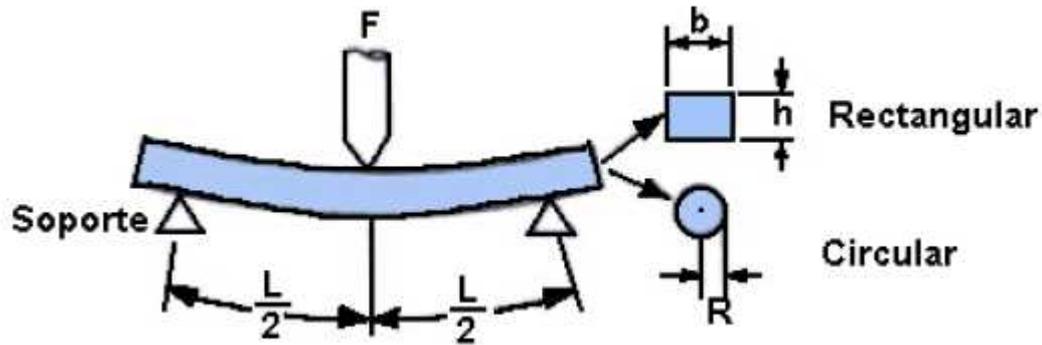


Figura 2.3 Esquema del ensayo de flexión simple [4].

El ensayo de flexión de tres puntos, proporciona la respuesta a la flexión del elemento estructural gracias a la curva tensión-deformación, de la que se obtienen valores del módulo de elasticidad a flexión E_f , la tensión a la flexión σ_f y la deformación a la flexión ϵ_f . El ensayo de flexión de tres puntos recibe su nombre porque la probeta se apoya en dos puntos de contacto, y luego se le aplica la carga (3^{er} punto). La principal ventaja de este ensayo, es la facilidad de la preparación de las muestras y pruebas. Sin embargo, este método tiene también algunas desventajas como que los resultados del método de ensayo son sensibles a la geometría de la muestra, a la carga y a la velocidad de deformación [5]. Para los ensayos de flexión de tres puntos se utilizan Máquinas de Ensayos Universales.

Para simular situaciones de impacto se necesita un alto grado de deformación. La Máquina de Ensayos Universal (del inglés UTM: Universal Tensile Machine) es normalmente muy lenta para este tipo de test. Para ello se usa una Torre de Caída como la de la Figura 2.4, que genera velocidades más altas. Posteriormente se tendrán que suavizar los resultados obtenidos para reducir el ruido y las vibraciones del sistema.

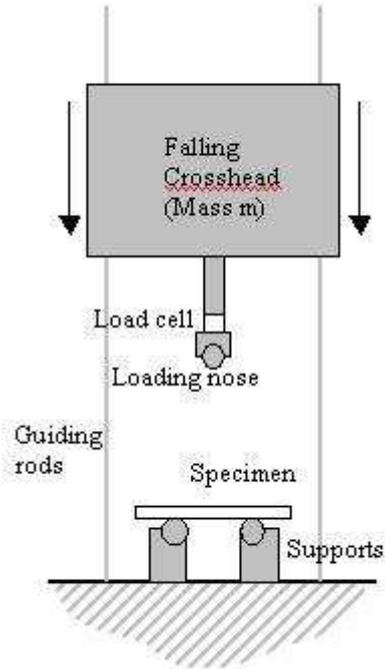


Figura 2.4 Esquema de la Torre de Caída [5].

Las curvas tensión-deformación obtenidas de estos ensayos, se calculan utilizando una aproximación elástica lineal. La distribución de tensiones en una viga sometida a tensión se explica en la Figura 2.5. Las frecuencias de baja vibración perturban en gran medida la forma global de la respuesta, por lo que es difícil entonces obtener las propiedades de los materiales de la curva. El objetivo es por tanto encontrar un modo establecido tal que el periodo de las oscilaciones sea mucho menor que la duración del ensayo. Se pueden utilizar filtros para suavizar la curva sin alterar su forma general. Centrándose en la mecánica del ensayo, se puede ver que los extremos de la probeta incrementan la inercia del sistema. Si se eliminan éstos extremos, las frecuencias naturales de la viga crecerían. Si se realiza la misma prueba, con la misma configuración, pero con una longitud reducida de viga, eliminando los extremos de la pieza como indica la Figura 2.6 se consigue mejorar la calidad de las señales.

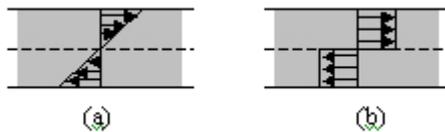


Figura 2.5 Los perfiles de tensiones en una viga en flexión. (a): elástico lineal, (b): totalmente de plástico [4].

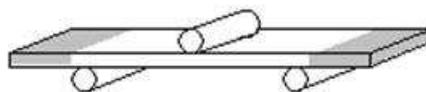


Figura 2.6 Áreas sombreadas cuya eliminación permite mejorar la señal [5].

En la Figura 2.7 se muestra la mejora de la calidad de la señal al reducirse el aumento de las frecuencias naturales que se consigue al usar probetas de menor longitud en un ensayo de flexión de tres puntos en una Torre de Caída.

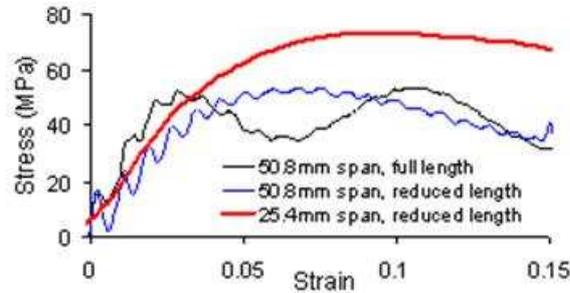


Figura 2.7 Respuesta del ensayo usando distintas configuraciones de las barras (ratio de deformación= 100 s^{-1}) [5].

Al usar una barra (probeta) de menor envergadura, se consigue reducir el ruido de la señal, pero además la nueva curva de la Figura 2.7 (en rojo) muestra también que al reducir la longitud, aumenta el límite de fluencia.

En los estudios analizados sobre comportamiento frente a impacto de elementos tubulares, la Torre de Caída incorpora una célula de carga que cae sobre la probeta de ensayo y graba el momento del impacto. Cuando el macho penetra sobre la probeta comienza la adquisición de datos de la célula de carga, y se registra, entre otros valores, la velocidad, hasta que el espécimen ya no resiste más y la célula vuelve a subir. Con los datos se obtienen curvas fuerza-tiempo, que son el posterior objeto de análisis de los estudios sobre elementos tubulares.

2.3.2 Parámetros de diseño

La función de la barra de protección en la industria del automóvil es proporcionar un alto nivel de seguridad para el pasajero en el caso de un impacto lateral con otro vehículo. La barra debe tener la capacidad de absorber la mayor energía de deformación que pueda, sin llegar a romper.

El elemento de seguridad se emplaza normalmente dentro de las puertas laterales del vehículo, más concretamente dentro de la armadura de la puerta (ver Figura 2.8). La posición exacta de la barra depende de las articulaciones estructurales de la puerta y la posición del asiento del pasajero en el coche. Un correcto emplazamiento contribuye considerablemente en la seguridad de los pasajeros.

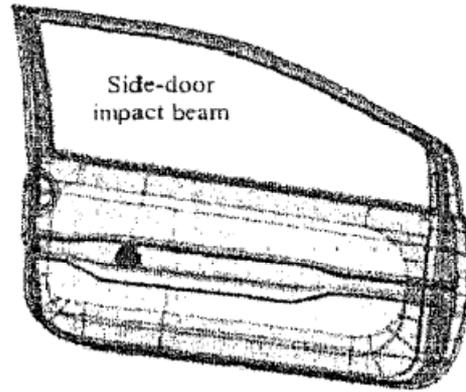


Figura 2.8 Ubicación de la barra lateral de impacto en la puerta del Renault Twingo [7].

El acero sigue siendo, ampliamente, el material más usado para componentes del automóvil. Sin embargo, los avances en la aplicación de materiales ligeros, como los FRP, están permitiendo su entrada en la industria del automóvil. Una correcta secuencia de apilamiento y orientación de las fibras contribuye a aumentar la absorción de energía, en comparación con el componente equivalente de acero. Los materiales compuestos poseen unos ratios muy altos de resistencia y rigidez frente a peso, tanto en la dirección de las fibras, como en la perpendicular a las mismas, aunque su módulo de Young es 15 veces menor que el del acero. Esto significa que los componentes de material compuesto necesitarán mayor espesor de las áreas bajo carga (se cambian los espesores y formas de la sección transversal), y mayores momentos de inercia para reducir los efectos de las deformaciones elásticas. La desventaja de los materiales compuestos, en comparación con el acero, son los altos costes de producción y de utillaje, mientras que el procesado de las partes complejas en una pieza es más sencillo.

Algunos elementos estructurales y definiciones relacionados con las barras de impacto lateral son:

- Uniones (Figura 2.9): el tipo de unión (por ejemplo: con pernos, remaches, uniones pegadas, soldadas...) influye en cómo se deforma el elemento y en el porcentaje de energía absorbida por la barra.
- Aletas laterales (Figura 2.10): representan un refuerzo adicional de la barra, y por tanto, contribuyen a incrementar la energía absorbida.
- Zona de refuerzo (Figura 2.12(a)): representa otro refuerzo adicional de la barra en el punto de aplicación de la carga. La longitud depende de la disposición de las juntas estructurales.



Figura 2.9 Barra unida rígidamente [7].

El objetivo es mostrar la alternativa de usar los elementos tubulares de material compuesto en el diseño de las barras de impacto lateral. La aplicación se eligió para la barra de protección lateral de la puerta delantera, para las que eran conocidas las uniones estructurales (Figura 2.10). Para un correcto diseño de la barra, se debe tener en cuenta el espacio disponible de la puerta: la profundidad de la puerta llamada B fue de 60 mm, 1250 mm para la longitud (L), y 170 mm para la altura. La profundidad B se refiere a la distancia de panel exterior al carril guía para subir y bajar la ventanilla. La altura H=60 se debe tener en cuenta para situar el elemento de seguridad en la correcta posición de la puerta.

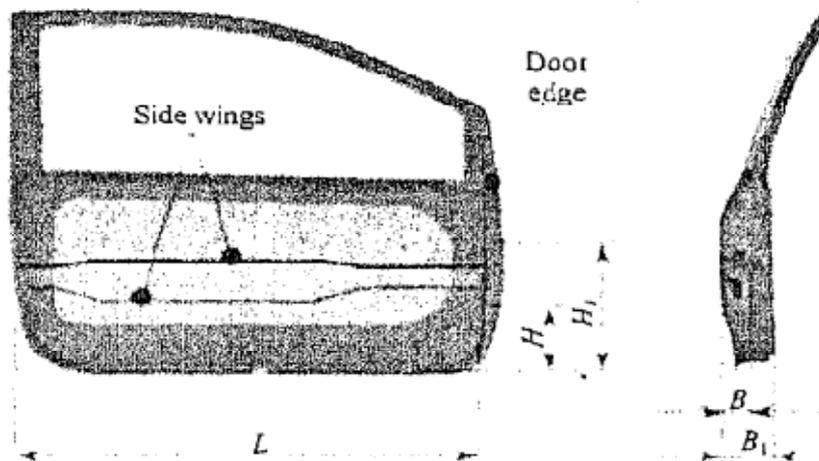


Figura 2.10 Restricciones geométricas para el modelo de puerta del Renault Twingo [7]

A la hora de diseñar la barra de impacto lateral, en el estudio de S. Erzen et ál [7], se tienen en consideración las normas 70/156/EC y 96/27/EC del estándar europeo ECE-R95. Esta normativa hace referencia a un test, donde una barrera móvil deformable impacta a 50 km/h (13.8 m/s) lateralmente en el coche, a 90°. La velocidad debe permanecer constante en los últimos 0.5 metros antes del contacto físico.

También se deben de tener en cuenta otros parámetros para realizar la prueba correctamente, pero no afectan al cometido del diseño de los elementos de seguridad estructurales (por ejemplo colocación de los sensores, posiciones de los dummies, etc).

Los bloques deformables, situados de cara a la barrera de impacto, alcanzan la puerta a una altura de 350 mm del nivel del suelo. Esta es la altura a la que las consecuencias del choque son más graves para el pasajero, (por ejemplo lesiones de cadera). Para incrementar el nivel de seguridad de los pasajeros, el elemento de seguridad transversal debe estar situado a la correcta altura con respecto a la puerta lateral.

Los ensayos de la norma ECE-R 95 son extremadamente caros, por lo que se suele usar, en sustitución, un ensayo simplificado en laboratorio. En éstos, el impacto en la barra se produce en el centro de la misma con un martillo de impacto de 13 kg de masa, lanzado a una altura determinada como muestra el esquema de la Figura 2.11. Se debe prestar atención a una posible ruptura de la barra de impacto.

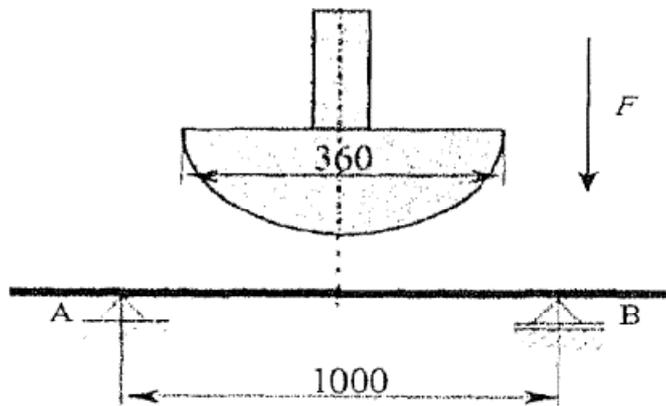


Figura 2.11 Esquema del ensayo de la barra de impacto en el laboratorio [7].

El diseño existente de la barra lateral de la puerta del Renault Twingo está hecho en acero ISO 31CrNiMo8. El propósito es alcanzar un alto porcentaje de energía absorbida, adaptando el diseño existente para la barra de acero. La nueva longitud de la barra es 1200 mm. La zona de refuerzo, donde se esperan mayores tensiones y deformaciones, es de 540 mm de largo y se sitúa teniendo en cuenta la posición de la carga aplicada (Figura 2.12 (b)). La sección transversal de la barra tiene forma de doble S, es de 80 mm de ancho en la sección más estrecha y 135 mm en la más ancha como se muestra en la Figura 2.13. El espesor del elemento tridimensional es de 1.3 mm y es constante a través de toda la estructura , dando una masa total de 2.36 kg.

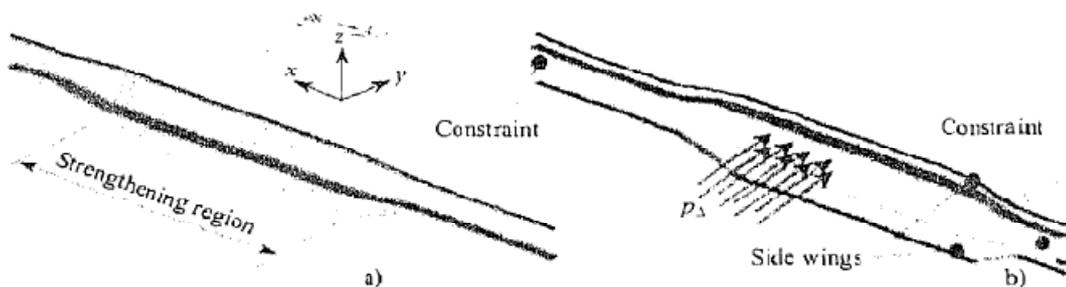


Figura 2.12 Barra de impacto lateral con las condiciones de contorno: (a) lado frontal y (b) lado posterior [7].

Las aletas laterales de la Figura 2.12(b) están curvadas y representan un refuerzo adicional, que hace que disminuyan las deformaciones, al mismo tiempo que incrementan el porcentaje de energía absorbida comparado con el diseño de acero. La mayor proporción de energía absorbida por las alas laterales se da en la región plástica de la deformación del material. Se espera que las alas laterales se comben hacia dentro al aplicarse la carga. El estrecho hueco que existe entre una sección transversal y otra evita la concentración de tensiones.

La barra se diseña para ser simétrica, debido a su emplazamiento en la puerta de acuerdo con el estándar ECE-R95. Los agujeros de conexión de los extremos de la barra no se tienen en cuenta. Las barras de acero son soldadas a la estructura de la puerta, mientras que las barras de material compuesto se pegan. El atornillado de las barras de material compuesto tampoco se tiene en cuenta en el análisis de S. Erzen et ál [7]. En el caso de la puerta del Renault Twingo, la barra está unida a la puerta por soldadura.

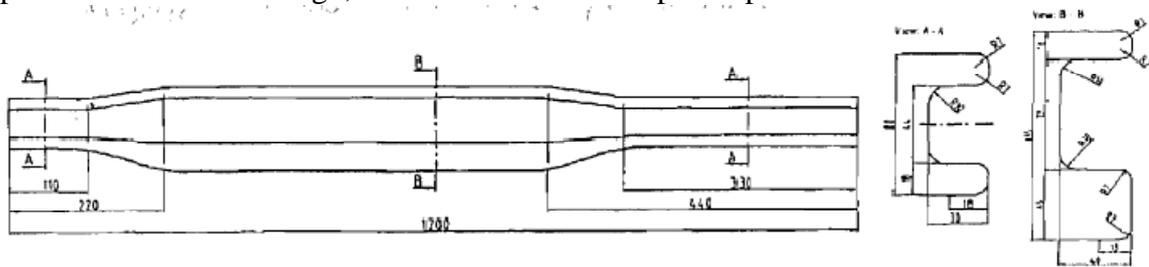


Figura 2.13 Dimensiones de la barra de impacto lateral [7].

Con estas consideraciones se evalúa la funcionalidad de la barra. El siguiente paso es comparar la rigidez, resistencia, masa, y energía absorbida a través del análisis computacional que proporciona el FEM.

La Figura 2.14 muestra un esquema de la forma y el montaje de las barras de protección lateral en otros vehículos. La longitud de las barras de protección para turismos compactos de pasajeros son 803 mm y 507 mm, para las puertas delanteras y traseras respectivamente.

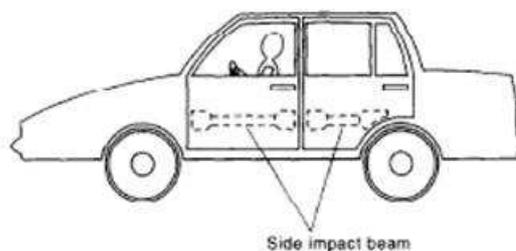


Figura 2.14 Forma y disposición de las barras de protección lateral en turismos [6].

Para fabricar las barras de protección a partir de elementos tubulares de material compuesto, también se deben determinar otros parámetros de diseño como secuencia de apilamiento, forma y rigidez de la sección transversal de los elementos tubulares. La Tabla 2.1 muestra las propiedades mecánicas del acero de alta resistencia y de la fibra de vidrio en epoxy. Consultando el ensayo Charpy de impacto, se eligió la fibra de vidrio como material de la barra para el estudio de Seong Sik Cheon et ál [6]. Se comparará con una aleación de acero de alta resistencia AISI 4340. La composición de dicha aleación se

incluye en la Tabla 2.2. La secuencia de apilamiento de la barra se determinó usando los resultados del ensayo de flexión en tres puntos.

	Acero de alta resistencia (AISI 4340)	Compuesto de fibra de vidrio-epoxi
Ensayo de impacto Charpy (kJ/m ²)	214	622
Densidad (kg/m ³)	7870	1980
E _x (GPa)	210	43,5
E _y (GPa)	210	5
v _{xy}	0,3	25
G _{xy} (GPa)	80,8	5
X ^t (GPa)	1,5	1

Tabla 2.1 Propiedades de acero de alta resistencia y compuesto de fibra de vidrio-epoxi [6].

	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo
AISI 4340	0,38- 0,43	0,60- 0,80	0,035	0,04	0,15	1,65- 2,00	0,70- 0,90	0,20- 0,30

Tabla 2.2 Composición del acero AISI 4340 [6].

En este estudio de Seong Sik Cheon et ál [6] se seleccionaron cinco secuencias de orientación de las fibras: $[0^\circ]_{nT}$, $[\pm 15^\circ]_{nT}$, $[0_2^\circ/90^\circ]_{nT}$, $[0_3^\circ/90^\circ]_{nT}$ y $[0_{16}^\circ/90_4^\circ]_T$, para las barras de material compuesto de fibra de vidrio en matriz epoxi. La masa de cada una de las barras de 507 mm de longitud es de 0,25 kg y la sección transversal estudiada es circular. Los diámetros exterior e interior de las barras son 31,8 y 26,3 mm respectivamente. La dirección axial o longitudinal elegida es a 0° . Los ensayos de flexión de tres puntos se llevaron a cabo usando una Máquina Instron 4206 para determinar la secuencia de apilamiento óptima para las barras de material compuesto. La envergadura del macho y el diámetro del cilindro de carga para los ensayos de flexión fueron 250 y 25,4 mm respectivamente. Los resultados de este ensayo se muestran en la Figura 2.15.

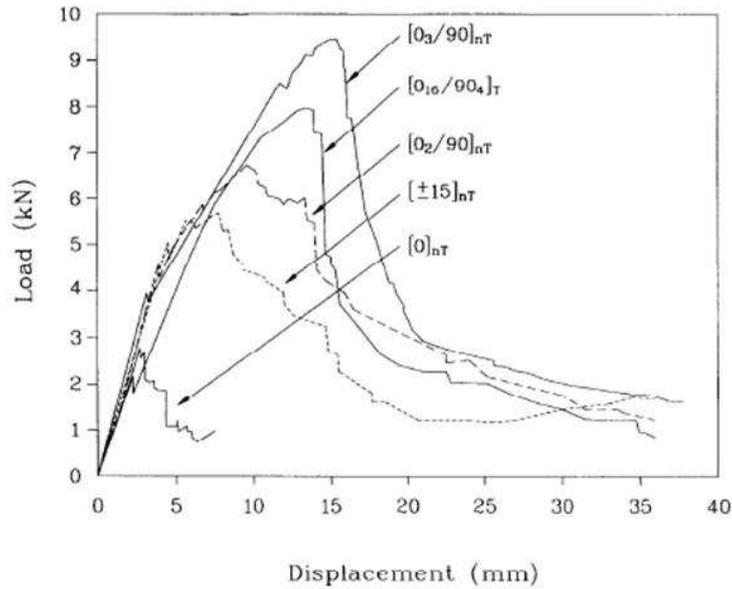


Figura 2.15 Curvas fuerza-desplazamiento de las barras de protección de impacto de material compuesto según la secuencia de apilamiento de las fibras [6].

A partir de la Figura 2.15 se denota que la secuencia $[0^\circ]_{nT}$ podría no aguantar de forma efectiva la carga externa debido a su poca capacidad de carga. En el caso de $[0_{16}^\circ/90_4^\circ]_T$ la fibra a 0° podría no resistir la carga una vez hayan cedido las fibras a 90° . Por consiguiente las fibras a 90° deberían ser apiladas uniformemente a través de toda la sección transversal de la barra. Los apilamientos de $[\pm 15^\circ]_{nT}$ y $[0_2^\circ/90^\circ]_{nT}$ muestran un comportamiento similar, sin embargo éste último es más deseable debido a su capacidad de cortar y sostener la matriz. Finalmente se aplica una capa adicional de 0° para reforzar la rigidez a flexión para dar la secuencia de apilamiento $[0_3^\circ/90^\circ]_{nT}$.

Los materiales compuestos tienen la tendencia a flectar debido a cargas concentradas que alcanzan la carga aplicada. En consecuencia la fractura sucede a relativamente bajas cargas externas. Por ello se estudian varias formas de sección transversal, como las mostradas en la Figura 2.16.

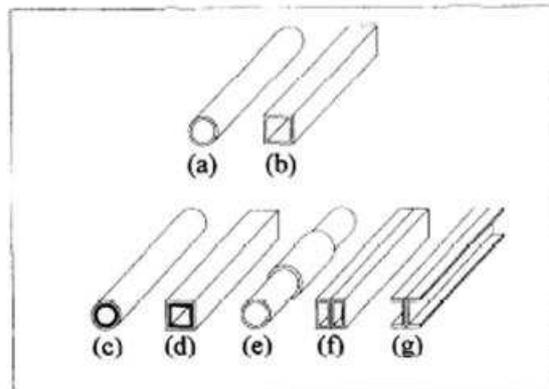


Figura 2.16 Formas variadas de sección transversal de las barras de material compuesto [6].

La barra de impacto (a) en la Figura 2.16 tiene una sección circular hueca, la (b) tiene una sección cuadrada, la (c) es un material compuesto envuelto en un tubo de acero de bajo contenido en carbono, (d) es un material compuesto envuelto en un tubo cuadrado de

acero de bajo contenido en carbono, (e) es un tubo reforzado en la parte central, (f) es una barra se sección cuadrada con refuerzo vertical y (g) es una viga de sección tipo I de material compuesto. Se usaron en este estudio de Seong Sik Cheon et ál [6], dos espesores distintos para las barras de impacto para que los peso de las barras tuvieran un 50% y un 70% del porcentaje del peso de las barras de impacto de acero de alta resistencia, cuyos diámetros interno y externo fueron 31.8 mm y 27.4 mm, respectivamente. La masa y la longitud de las barras de protección de impacto de acero de alta resistencia fueron 0.825 kg y 507 mm.

2.3.3 Fabricación de los elementos tubulares

Para la fabricación de los elementos tubulares de material compuesto en el estudio de Seong Sik Cheon et ál [6], se diseñaron y construyeron moldes para las diversas secciones de las barras. Se uso la UGN tipo 150 de fibra de vidrio en matriz epoxi unidireccional fabricada por Sun Kyung Industry (Corea del Sur) en autoclave por el método de gasificación por bolsa de vacío.

La Figura 2.17 muestra la secuencia de fabricación para las barras de sección circular de material compuesto. Primero una lámina no porosa de Teflón se envuelve en un mandril de acero como se muestra en la Figura 2.17 (a). Después la matriz se corta en el tamaño y ángulo apropiado y se apila en el mandril envuelto de laminas de teflón, como se muestra en la Figura 2.17(b). Después de quitar el mandril, como muestra la Figura 2.17(c), la matriz enrollada se sitúa en la parte de abajo del molde, como se aprecia en la Figura 2.17(d). Después de montar los módulos superior e inferior, atornillándolos, como muestra la Figura 2.17(e), la matriz interior del molde se cura en la autoclave y se hace el empaquetamiento completo de las fibras con una bolsa de vacío como indica la Figura 2.17(f).

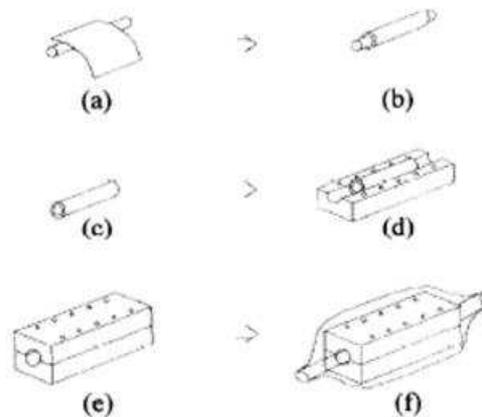


Figura 2.17 Diagrama esquemático de la secuencia de fabricación para las barras de material compuesto [6].

La barra de protección de impacto de sección circular de material compuesto es pegada a los soportes de montaje. Después de pintar, el color amarillo verdoso de las fibras de vidrio en epoxi se vuelve negro.

Las barras de sección cuadrada fueron fabricadas usando el molde con forma cuadrada. Los métodos de fabricación para las vigas cuadradas con refuerzo vertical, así como la viga tipo I, se muestran en la Figura 2.18.

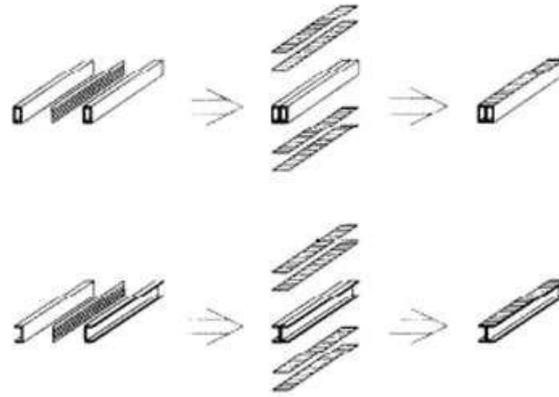


Figura 2.18 Diagrama de los métodos de fabricación para barras de protección de impacto de sección cuadrada, con refuerzo vertical y para vigas tipo I [6].

La barra de sección cuadrada con refuerzo vertical se fabricó por curado de la capa insertada entre la intercara y las dos capas de la matriz preimpregnada, ambas situadas en las superficies superior e interior de los dos compuestos rectangulares ya fabricados. Para las barras de sección tipo I se usó un procedimiento similar.

La etapa previa al curado dura 30 minutos a 80 °C, y se emplea para consolidar la unión entre las capas preimpregnadas de epoxi. Después, la temperatura del autoclave se incrementa a 120°C para el curado. Durante el ciclo completo de curado se mantiene el estado de vacío a través de una bolsa de vacío que mantiene una presión del aire exterior a 0,6 MPa. La sección transversal de las barras se pinta para mejorar su visibilidad.

2.3.4 Estudio estático

Los útiles y los cilindros de carga se preparan para el estudio de Seong Sik Cheon et ál [6], basándose en la regulación FMVSS (del inglés estándar de seguridad de vehículos de motor estatal) 214 que especifica las propiedades estáticas de las puertas laterales de los coches pasajeros. La Figura 2.19 muestra el útil para el ensayo de flexión de las barras de impacto.

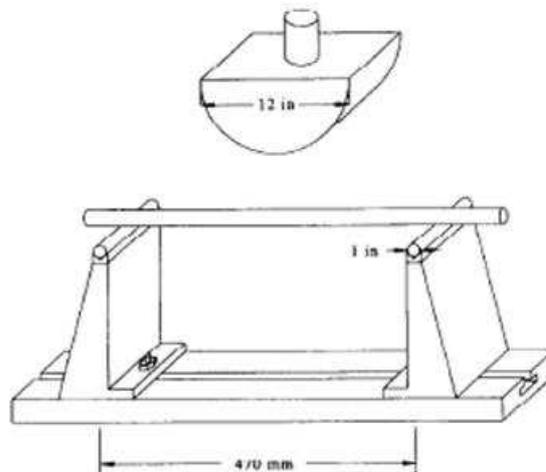


Figura 2.19 Utilaje del ensayo de flexión estática de tres puntos [6].

Como muestra la Figura 2.19, los útiles de apoyo se sitúan a 470 mm y se usan dos cilindros de 25,4 mm como soporte de las barras para garantizar el contacto en un único punto. La carga la proporciona una Máquina de Ensayos Instron 4206, a través de un semicilindro de carga de 304 mm de diámetro, en el punto central de la barra de impacto. La secuencia apilamiento para todas los compuestos fue $[0_3^{\circ}/90^{\circ}]_{nT}$. Las barras prototipo se fabricaron y ensayaron con ratios de peso de 50% y 70% respecto a las barras de acero. A partir de los experimentos se registró que la capacidad de carga de las barras de impacto de acero de alta resistencia es de 27.3 kN, mientras que la capacidad de carga de las barras de sección circular de material compuesto es 16.2 kN. Las barras de material compuesto colapsaron localmente debido a la carga concentrada que es desfavorable para una sección circular. Las barras de sección cuadrada de material compuesto fueron capaces de resistir hasta 25,3 kN de carga externa debido a que el área de contacto de la sección transversal es mayor que en el caso de la sección circular. La barra fabricada con material compuesto envuelto de acero de bajo contenido en carbono alcanzó una carga más baja, de 12.5 kN , antes de la falla, y además contando con una baja disminución de peso debido al acero incrustado. La barra de impacto reforzada en la parte central también alcanzo una baja carga externa de 17 kN antes de fallar. El tamaño de la parte central de la barra está limitado por el montaje del ensayo. Por consiguiente la barra de protección con la parte central reforzada no sería apta para ser usada. La barra de sección cuadrada de material compuesto con refuerzo vertical resistió una carga externa de 27.1 kN antes de fallar, similar a la barra de acero. La barra de sección tipo I soportó 25 kN, que también se asemeja a las barras cuadradas. La Figura 2.20 muestra la capacidad de carga estática de las barras de impacto.

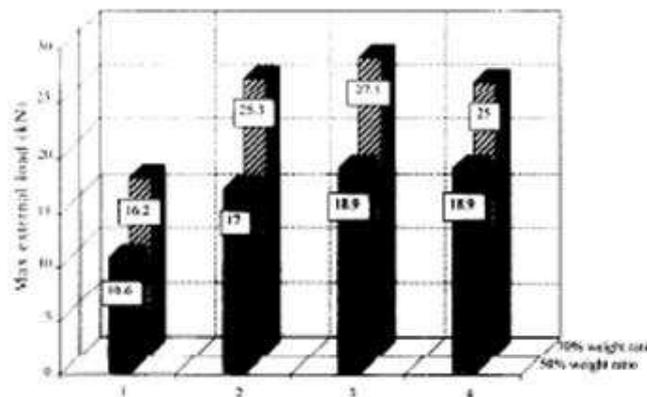


Figura 2.20 Capacidad de carga estática de las barras de protección de secuencia $[0_3^{\circ}/90^{\circ}]_{nT}$ para ratios del 50 y el 70% del peso de la barra de acero. 1, sección circular; 2, sección cuadrada; 3, sección cuadrada con refuerzo vertical; 4, sección tipo I [6].

La capacidad de carga estática de las barras, también se analizó numéricamente usando ABAQUS/Standard. El elemento empleado tanto para las barras de acero como para las de material compuesto fue C3D8R (sólido tridimensional. 8 nodos, integración reducida). Solo se modeló un cuarto de la sección de las barras para incluir el fenómeno de contacto entre la barra de impacto y el cilindro de carga. El cilindro de carga se supuso como un elemento rígido. Las propiedades ortotrópicas de los materiales compuestos mostradas en la Tabla 2.1 se usaron teniendo en cuenta la secuencia de apilamiento. La forma deformada de las barras de acero en el análisis de elementos finitos se muestra en la Figura 2.21.

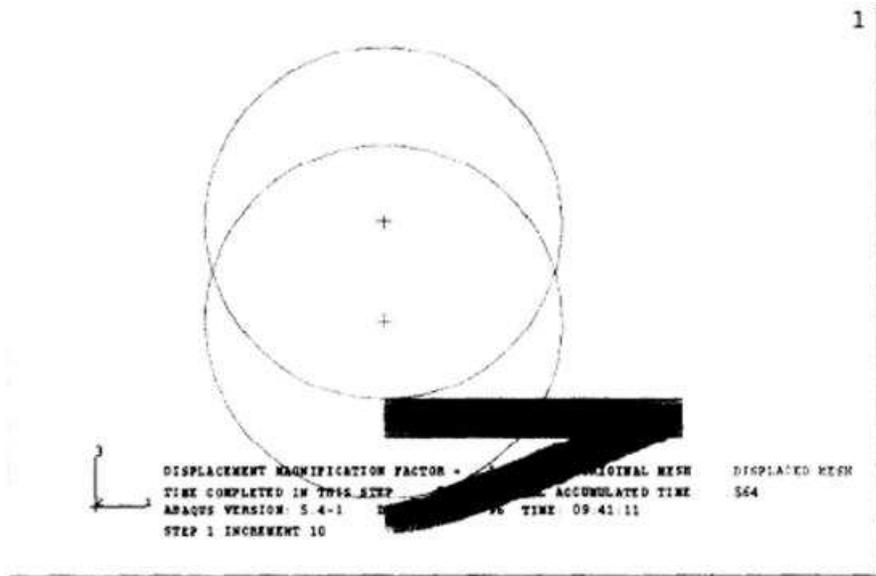


Figura 2.21 Deformada de la barra de impacto [6].

La Figura 2.22 muestra los resultados de los análisis de elementos finitos del estudio realizado por Seong Sik Cheon et ál [6], los cuales muestran una concordancia relativamente alta entre los resultados experimentales y los computacionales. Las líneas superiores y las inferiores representan a los ratios de 50% y 70% del peso con respecto al del acero. Se representan las curvas de los análisis por elementos finitos y experimentales conjuntamente.

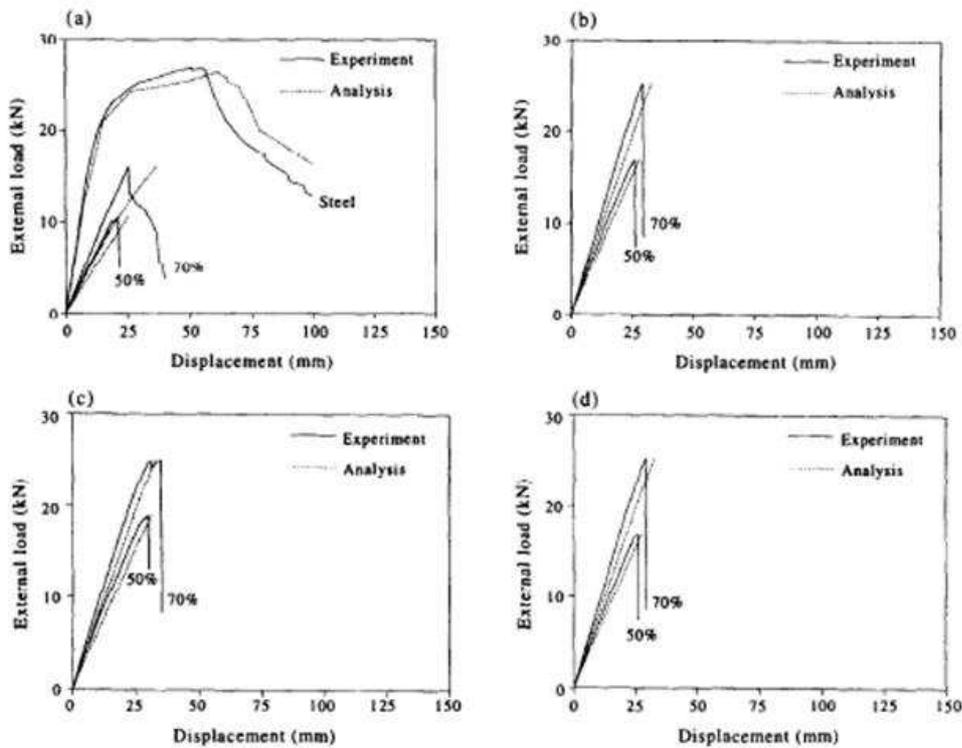


Figura 2.22 Comparativa entre los resultados de los ensayos estáticos, y el análisis de elementos finitos. (a) Sección circular, (b) sección cuadrada; (c) sección cuadrada con refuerzo vertical; (d) sección tipo I [6].

A partir de los resultados experimentales y el análisis numérico se demuestra que las barras de protección de impacto de sección cuadrada con refuerzo vertical tienen una resistencia estática comparable a las de acero de alta resistencia. Sin embargo las barras de material compuesto tienen una baja capacidad de absorción de energía debido a que los materiales compuestos normalmente no presentan grandes regiones de comportamiento plástico antes de ocurrir el fallo. Pero como las barras de impacto se ven sometidas a cargas dinámicas durante el choque en un vehículo, la capacidad de absorción de energía de impacto dinámica es más importante que la capacidad de absorción estática. Por ello en la nueva regulación FMVSS 214 de 1993 se introducen estos test dinámicos para los vehículos.

2.3.5 Estudios dinámicos

Para investigar las características dinámicas de las barras de impacto se desarrolló un test de impacto, dentro del estudio realizado por Seong Sik Cheon et ál [6], cuya velocidad de impacto se incrementa con un cilindro neumático, como muestra la Figura 2.23.

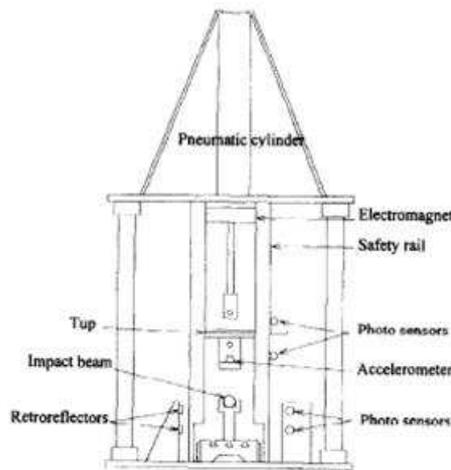


Figura 2.23 Dibujo esquemático de la máquina de ensayos dinámicos con cilindros neumáticos [6].

El radio de 25 mm del punzón de impacto se acelera cuando el circuito electromagnético, que sujeta el pistón en el cilindro neumático, está apagado. Cuando la presión en el cilindro es de 0.5 MPa la velocidad del punzón de 13 kg es de más de 30 mph. Durante el proceso de impacto, las velocidades del punzón antes y después del impacto se miden con cuatro fotosensores o sensores fotoeléctricos. Los dos sensores fotoeléctricos superiores se usan para medir la variación de tiempo en 50 mm de desplazamiento, mientras que los sensores fotoeléctricos inferiores se usan para medir la variación de tiempo en 100 mm de desplazamiento. Como los sensores fotoeléctricos inferiores son infrarrojos de tipo emisor-reflector el intervalo entre ellos se estableció en 100 mm considerando el espacio para la reflexión con un espejo de diámetro 85 mm. Por otro lado, los dos sensores superiores son de fibra óptica, sin necesidad de espejos, y por ello su intervalo es menor (50mm).

La aceleración de la célula de carga se midió también con un acelerómetro enganchado a la propia célula. Las señales de los sensores fotoeléctricos y del acelerómetro se procesan en un PC (del inglés Personal Computer) a través de un convertidor A/D.

La masa de la célula de carga se ajusta en un rango de 10 a 15 kg para variar la magnitud del impacto. También la velocidad se ajusta en un rango de 1 a 25 m/s variando la

presión dentro del cilindro. A las señales medidas del acelerómetro se les pasa un filtro paso bajo con 100 kHz de frecuencia de corte.

Para este caso se ensayó la barra de acero de alta resistencia de sección transversal circular de diámetros exterior e interior 30 y 27.4 mm respectivamente. El acero, que fue sometido a tratamiento térmico en todo su espesor, tuvo una resistencia última a tensión de 1,5 GPa. La masa y la longitud de la barra fueron 0.5 kg y 507 mm respectivamente. Se usó un útil de 360 mm de envergadura. Cuando la masa de la célula de carga y la presión en el cilindro eran 13 kg y 0.5 MPa respectivamente, la velocidad de la célula de carga fue 13,1 m/s (29 mph, 47km/h), muy cercano a la velocidad de 48,28 km/h (30 mph) que indica las normativa americana de impactos en vehículos FMVSS214 o la europea ECE-R95. En los tests se aplicaron unos 1100 J de energía a cada probeta.

En los test dinámicos, ya que las barras de 0,25 kg (50% de ratio de peso) mostraron una capacidad de absorción de energía dinámica suficiente, solo se ensayaron barras de material compuesto de 0.25kg. La Figura 2.24 muestra la variación de tiempo medida por los cuatro sensores fotoeléctricos durante el ensayo dinámico de las barras de acero a 25°C.

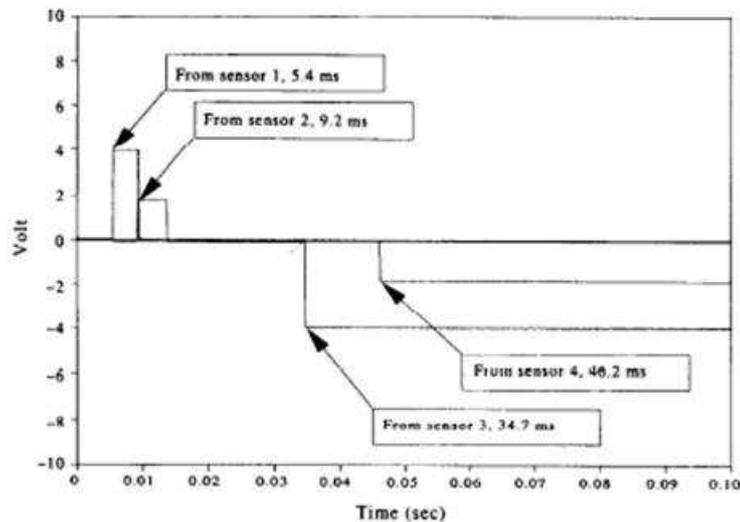


Figura 2.24 Señal de salida de los sensores fotoeléctricos [6].

A partir de la Figura 2.24, la velocidad medida inicialmente de la célula de carga fue 13.1. m/s ($V_i=50\text{mm}/3.819\text{ms}$), y la velocidad que se registró después del impacto en la barra fue de 8.75m/s ($V_f=100\text{mm}/11.43\text{ms}$). Por tanto se calcula el ratio de absorción de energía, con la Ecuación 2.1:

$$\text{ratio_de_absorción_de_energía} = 1 - V_f^2 / V_i^2 \quad \text{Ecuación 2.1}$$

El ratio calculado fue del 55%. La barra de material compuesto de fibra de vidrio en matriz epoxi de 0,25 kg de masa, registró una absorción de energía del 53 % de la energía de impacto aplicada en un ambiente a 25°C. Por ello, se demuestra que se puede ahorrar el 50 % del peso de una barra de protección lateral de acero empleando en su lugar barras de protección de material compuesto, basándose en la capacidad de absorción de energía dinámica. Además, las barras de material compuesto mostraron valores muy similares de absorción de energía independientemente de las formas de su sección transversal, aunque

la resistencia estática es mucho más dependiente del tipo de sección transversal de las barras de material compuesto, como muestra la Tabla 2.3.

Forma de la sección transversal	Circular (0,25 kg)	Cuadrada (0,25 kg)	Cuadrada con refuerzo (0,25 kg)	Tipo I (0,25 kg)
Ratio de absorción de energía	53,2%	52,9%	52,5%	53,3%

Tabla 2.3 Porcentajes de absorción de energía para las cuatro secciones de las barras de material compuesto [6].

Para investigar la influencia de la temperatura en las barras en el estudio de Seong Sik Cheon et ál [6], se realizaron ensayos a muy bajas temperaturas. La Figura 2.25 muestra la absorción de energía de impacto de las barras, en función de la temperatura ambiente. La baja temperatura se consiguió situando las barras dentro de una caja llena de hielo seco, y se recogió la temperatura exterior de la barra con una sonda termométrica.

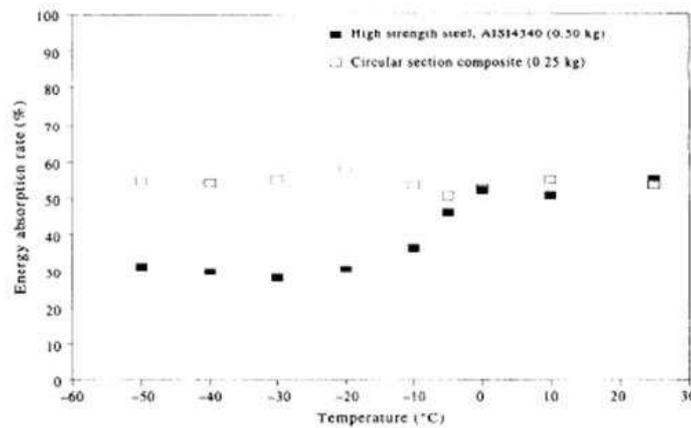


Figura 2.25 Resultados de energía dinámica absorbida en función de la temperatura para barras de acero de alta resistencia y material compuesto [6].

La Figura 2.25 revela que la absorción de energía de las barras de acero decrece a medida que baja la temperatura, mientras que la barra de material compuesto tiene un comportamiento casi constante de absorción de energía. Como era de esperar que el punto medio de absorción de energía estuviera entre los 0°C y los -10°C, se realizó un ensayo a -5°C. A partir del ensayo se estimó que la temperatura a la que pierde toda la ductilidad la barra de acero se encuentra entre -5°C y -10°C.

En este estudio del comportamiento frente a impacto de elementos tubulares de material compuesto realizado por Seong Sik Cheon et ál [6], se desarrollaron y fabricaron barras de protección lateral de material compuesto. Con el ensayo de flexión de tres puntos se demostró que las barras de material compuesto de sección circular tienen tendencia a flectar con cargas relativamente bajas, las cuales pueden llevar a un fallo local del material y a su fractura. Sin embargo las barras de sección cuadrada de material compuesto, especialmente las que llevan refuerzo vertical, podrían resistir cargas externas comparables a las que resisten las barras de acero de alta resistencia. Las barras de fibra de vidrio en matriz epoxi consiguen una reducción del 30% del peso con respecto a las barras de acero de alta aleación basándose en los ensayos de flexión estáticos.

Para investigar las características dinámicas de las barras a diferentes temperaturas se usó un test de impacto neumático. De los ensayos dinámicos se encontró que las barras de material compuesto tienen mejor capacidad de absorción de energía que las barras de acero de alta aleación. La forma de la sección transversal de las barras tiene poca influencia en la capacidad de absorción de energía de impacto según los resultados que se obtuvieron. Sin embargo las temperaturas ambientales bajas (-10°C), sí que disminuyen significativamente la capacidad de absorción de energía, para las barras de acero, por lo que se concluye, que la temperatura de ductilidad cero del acero de alta resistencia puede ser de aproximadamente -10°C . Las barras de fibra de vidrio impregnadas en epoxi consiguen una reducción del 50% del peso con respecto a las barras de acero de alta aleación basándose en los ensayos dinámicos.

Con los resultados obtenidos del estudio de Seong Sik Cheon et ál [6], se demostró que las barras de material compuesto no solo reducen el peso de las barras convencionales de acero hasta en un 50%, sino que también mantienen una capacidad de absorción de energía de impacto constante para variaciones de temperatura ambiente.

2.3.6 Análisis de elementos finitos

Para llevar a cabo el análisis de elementos finitos en el estudio de S. Erzen et ál [7], primero se determinaron las propiedades físicas y mecánicas del acero y del material compuesto Twintex. El acero es un material isotrópico, y requiere solo un módulo de elasticidad E y coeficiente de Poisson ν , mientras que el Twintex tiene estructura ortotrópica (distintas propiedades mecánicas en función de la dirección de estiramiento). Para simplificar el análisis, se usó una clase especial de material ortotrópico, llamado isotrópico transversal. Tiene las mismas propiedades en un plano (por ejemplo, en el plano x - y) y diferentes propiedades en la dirección normal a ese plano (por ejemplo, en el eje z) El comportamiento de este material puede ser descrito por cinco constantes elásticas independientes. Las características de las curvas tensión-deformación para ambos materiales se muestran en la Figura 2.26. El acero produce un comportamiento no lineal, y el Twintex, un comportamiento lineal, como se aprecia en la Figura 2.26. Los datos de partida se presentan en la Tabla 2.4.

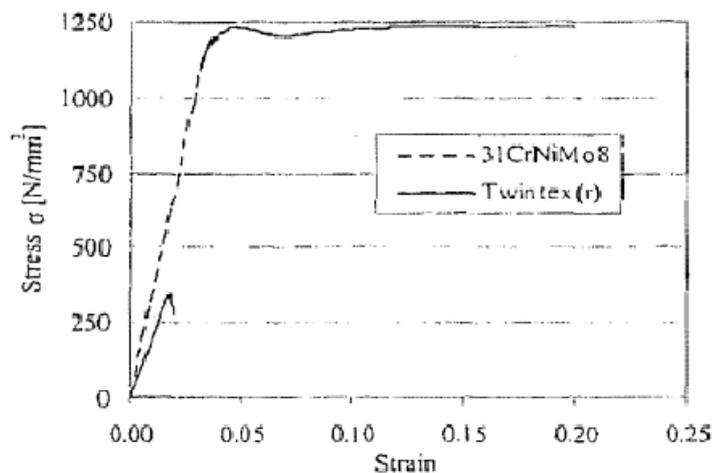


Figura 2.26 Curvas tensión-deformación para el acero y el compuesto Twintex [7].

Material	Densidad (g/cm ³)	Módulo de Young (MPa)	Coefficiente de Poisson ν	Límite elástico (MPa)	Módulo de Plasticidad (MPa)	Resistencia a tensión (MPa)	Módulo de cortadura (GPa)	Espesor (mm)
Acero 31CrNiMo8	7,833	206	0,29	1160	667	1240	79	0,6
Compuesto Twintex TPEAT4460K	1,5	13,79/12,97	0,10/0,12	-	-	350	1,72/1,59	0,1

Tabla 2.4 Propiedades mecánicas y físicas de los materiales usados en el análisis [8].

La resistencia a cortadura de la matriz termoplástica es 35 N/mm^2 .

El modelo computacional del elemento de seguridad se creó a partir de elementos tipo placa cuadrangulares. Se usaron elementos placa rectangulares en lugares donde no se podían conectar los elementos cuadrangulares. El tamaño del elemento, en las zonas restringidas, el área de carga y las áreas suavizadas, se definió en 7 mm desde una sección transversal hacia la otra. Para el resto del modelo se utilizó un tamaño de los elementos de 10 mm.

Al elegir las condiciones de flexión en el estudio de S. Erzen et ál [7], se tuvieron en cuenta las dimensiones reales de la estructura de la puerta y las normas 70/156/ECC. La carga aplicada fue de $F=40 \text{ kN}$. El problema del contacto no se incluye en el análisis, porque la solución no converge. Por esta razón la carga se distribuyó uniformemente como una presión en la superficie, lo que representa un posible contacto entre la barra y el martillo de impacto como se indicó en la Figura 2.12(b). La distribución representa la peor situación de carga.

Se analizaron dos tipos de restricciones para las barras laterales. La solución más común para unir estructuras es la soldadura, y se simuló como una restricción rígida en ambos extremos de la barra, como se observa en la Figura 2.27(a). El segundo tipo que se usó fue una restricción elástica, donde se tiene en cuenta el efecto de la deformación de la fuerza junto con el de la barra. Esto se simuló usando elementos barra unidimensionales en los huecos del área restringida. Estos elementos solo transfieren cargas axiales y tienen un comportamiento similar a elementos elásticos.

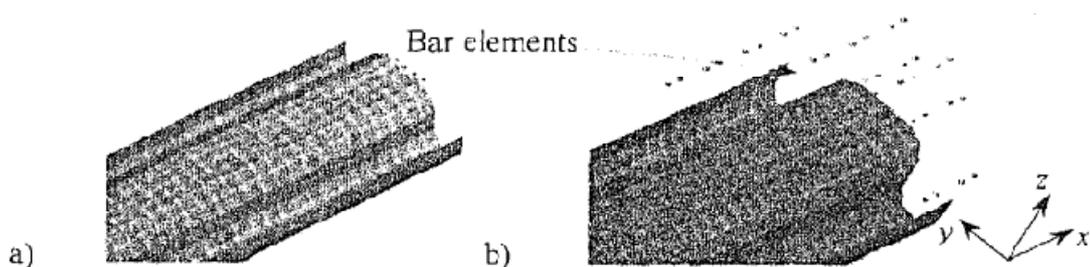


Figura 2.27 Restricciones en la barra: (a) rígida y (b) elástica [7].

El modelo geométrico se hizo con el software comercial I-Deas, con un análisis computacional de elementos finitos con MSC.visualNastran para Windows. El análisis estático, no lineal usado considera la no linealidad de la geometría y el material de la barra (en caso del acero, ya que para material compuesto, permanece lineal). A la hora de

definir el comportamiento elastoplástico no lineal del material, se usó una aproximación bilineal.

El efecto de las grandes deformaciones y rotaciones se tienen en cuenta en la definición de geometría no lineal. Esto se ensayó así, ya que el diseño inicial con pared delgada cambió significativamente la forma después de la deformación.

El modelo incremental e iterativo de simulación es necesario debido a la geometría y no linealidad del material, y para obtener una solución convergente, se tuvieron que ensayar un número determinado de iteraciones e incrementos de carga. A partir de los experimentos computacionales se halló que la carga se dividía desde 5 hasta 30 incrementos, y posteriormente se subdividía de 25 a 120 iteraciones. La tolerancia de carga de la convergencia se fijó en 0.001. Se usó en el análisis el método SEMI, que fuerza una matriz de rigidez que actualiza solo la primera iteración de un incremento de carga. Éste es efectivo en muchos casos no lineales, donde la matriz de rigidez actualizada hace que converja la solución.

El tiempo del análisis duró de 15 min a 2 horas para la barra de acero de 1,3 mm de espesor, sin embargo para espesores menores se requirió más tiempo para que la solución convergiera. Debido a la baja estabilidad estructural el punto de flexibilidad se excedió pronto en ambas estructuras, que para tiempos prolongados se dan en la región no lineal.

Se ensayaron las barras de acero y las de material compuesto Twintex. Para tener un amplio espectro de aplicaciones, se simularon cada una de las soluciones usando dos tipos de restricciones: las restricciones rígidas con todos los grados de libertad fijos; y las restricciones elásticas, simulando el tipo de deformación de la puerta. Con los cálculos numéricos, el objetivo es encontrar el espesor de pared de la barra de material compuesto óptimo para que el peso de la estructura sea mínima y la absorción de energía sea máxima sin llegar a la rotura.

A la hora de analizar la barra de acero, normalmente es suficiente con presentar los resultados para una única partida (esfuerzos, deformaciones, densidad de energía de deformación, etc). Sin embargo, para materiales compuestos, se necesita tratar con varias series de resultados correspondientes a cada capa, para juntos completar el estado de deformación y tensión del compuesto. Esto incluye tensiones normales y de cortadura en dirección de la fibra, perpendiculares a la fibra y transversales a cada capa.

El requerimiento básico de diseño para las barras de material compuesto es evitar la ruptura completa. En el diseño de las láminas, la ruptura de alguna de las laminas o deslaminación, generalmente ocurre antes del fallo de toda la estructura laminar. Para predecir la ruptura de la primera lámina se analiza el estado de tensión en cada lámina aplicando el criterio de fallo de máxima tensión (MSFC, del inglés Maximum Strength Failure Criterion). Este criterio muestra la incidencia de la rotura, pero no dice nada de la naturaleza de la misma. Este efecto se tiene en cuenta determinando los índices de deslaminación. Comprobar los índices para todas las capas es un proceso muy lento, en especial cuando aumenta el número de capas. De este modo, se usa para la evaluación un criterio de tensión máxima probable, como por ejemplo, el criterio de Von Mises. Éste es aceptable para materiales como el acero, isotrópicos, donde la tensión resultante se compara con la resistencia uniaxial del material. Los laminados, son altamente anisotrópicos, por lo que los esfuerzos resultantes no pueden ser calculados

analíticamente, y el criterio de Von Mises solo se usa como una herramienta para transformar un estado tensional multiaxial en 3D en uno uniaxial.

La solución de referencia usada en el estudio de S. Erzen et ál [7], fue la barra de protección de impacto lateral de acero de 1,3 mm de espesor, cuyos desplazamientos y tensiones se muestran esquemáticamente en la Figura 2.28(a). Para mantener el mismo nivel de rigidez que en la barra de acero, el espesor de la barra de material compuesto se estimó en 4,2 mm. La masa de la barra de material compuesto en este estudio es de 1,45 kg, lo que supone un 38,5 % de reducción de peso comparada con la barra de acero (tabla 2). La secuencia de apilamiento inicial para el laminado simétrico de Twintex consiste en 14 capas con los siguientes ángulos de inclinación de las fibras $[0^\circ/\pm 80^\circ/\pm 60^\circ/30^\circ/0^\circ]_s$. En este caso la tensión máxima de Von Mises en la capa 1 excedió a 3560 N/mm^2 . La tensión normal en dirección perpendicular a la fibra de referencia del laminado, de acuerdo con MSFC, y todos los índices de deslaminación también fueron superados. Entonces se aumentó el espesor inicial a 5,6 mm, con una nueva secuencia de apilamiento de 28 capas $[\pm 45_2/\pm 80/0_2/\pm 30/\pm 80/\pm 45]_s$. El nuevo diseño de laminado se demostró adecuado ya que ninguna de las tensiones o índices de deslaminación fueron excedidos. Esta secuencia de apilamiento es capaz de absorber un 91,3% más energía que una barra de acero (Tabla 2.5). Con el objetivo de optimizar aún más la solución con mejores resultados, el espesor se incrementó a 6 mm (Figura 2.28 (b)), con un diseño de 14 capas de laminado con la secuencia de apilamiento óptima $[0/\pm 45/\pm 60/30]_s$, y consiguió una reducción de peso del 11,8%. Con esto, la capacidad de absorción de energía incrementó desde los 1164 J del acero a 2864 J (Figura 2.29), lo que supone un aumento del 146% (Tabla 2.5). Las tensiones y los índices en todas las direcciones también satisficieron todas las condiciones.

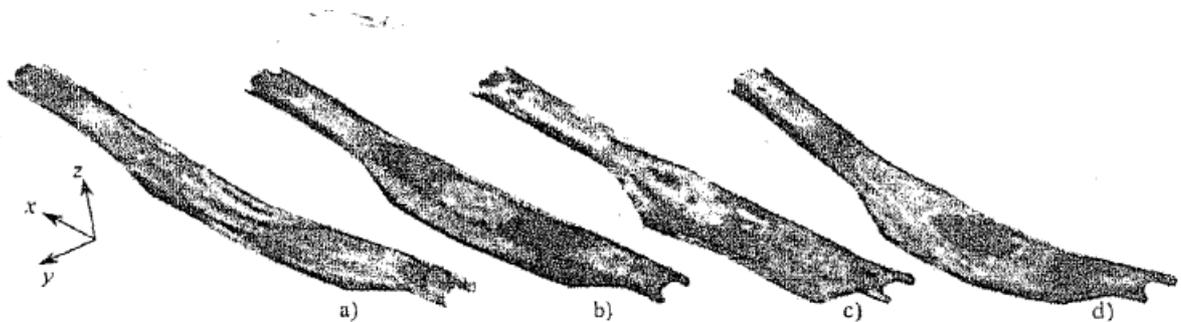


Figura 2.28 Desplazamientos máximos y distribuciones de tensión para la barra con restricción rígida: (a) acero, (b) material compuesto; y para la barra con restricción elástica: (c) acero y (d) material compuesto [7].

De la misma forma que con la barra sujeta a restricciones rígidas, los resultados para las barras con restricciones flexibles muestran un mejor comportamiento para el Twintex que para la estructura de acero (Figura 2.29). En este caso los desplazamientos se incrementaron hasta más del doble. Pero si se hubiera observado la estructura localmente (sin tener en cuenta la deformación de la puerta), los valores de deflexión calculados habrían sido mucho menores que los de la barra con restricciones rígidas. La razón de que el valor de energía absorbida sea casi el mismo, el 145,3% (Tabla 2.5), se atribuye a que parte de la energía la absorbe la misma puerta.

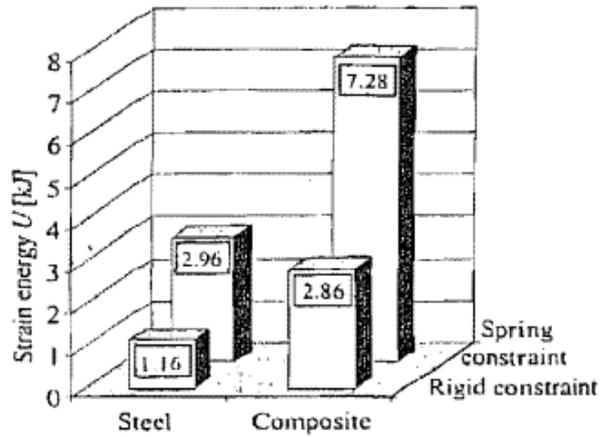


Figura 2.29 Energía de deformación [7].

De la Figura 2.30 se aprecia que la restricción rígida da una curva cóncava desde el punto inicial, que explica que durante la etapa inicial de deformación hay una transferencia gradual de impacto en la estructura, comparado con la barra de acero, donde la curva es convexa. Observando las curvas de restricción elástica la situación es ligeramente diferente durante la etapa central de la deformación, pero generalmente se asemeja con la de restricción de tipo rígida.

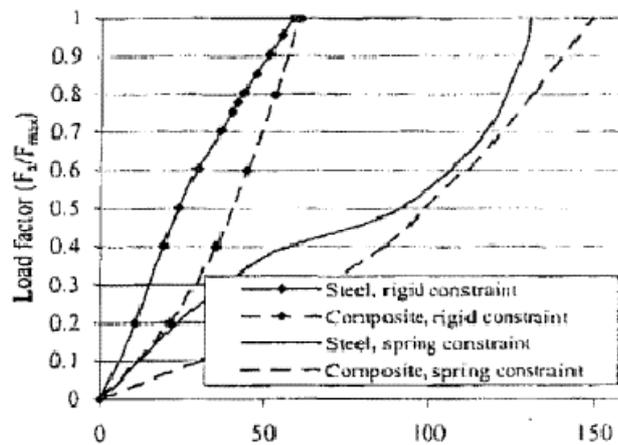


Figura 2.30 Curvas de carga axial frente al desplazamiento [7].

Se puede decir que los cambios geométricos en la estructura, por ejemplo, cambios del espesor de pared, pueden incrementar drásticamente la capacidad de absorción de energía de la barra de impacto lateral (ver Tabla 2.5). Esto influye directamente en el efecto de la reducción de peso, que cumple con la idea principal del problema, y que puede ser dada hasta una determinada rigidez mínima en donde la barra no rompe. Para indagar más acerca de la ruptura en sí misma, es recomendable analizar también tensiones y deformaciones al mismo tiempo.

	Material	Espesor t (mm)	Masa m (kg)	Δm (%)	Desplazamiento d (mm)	Tensión σ (MPa)	Energía de deformación U (J)	ΔU (%)
Restricción rígida	Acero 31CrNiMo8	1,3	2,36	-	84,3	1223	1164	-
	Compuesto Twintex	4,2	1,45	-38,5	76,3	308, lam 1	4331	+272,1
		5,6	1,9	-19,5	52,8	345, lam 5	2227	-91,3
6		2,08	-11,8	59,0	330, lam 1	2864	-146,0	
Restricción elástica	Acero 31CrNiMo8	1,3			181,0	1220	2967	-
	Compuesto Twintex	4,2			-	-	-	-
		5,6			-	-	-	-
		6,0			149,4	250, lam 1	7279	+145,3

Tabla 2.5 Comparación de los resultados de la simulación [7].

Este texto de S. Erzen et ál [7], estudia la viabilidad de usar elementos tubulares fabricados con materiales compuestos para barras de protección de impacto lateral en coches de pasajeros, a través de simulaciones por ordenador de su comportamiento bajo carga. Los requerimientos de diseño de la barra de material compuesto imponen que ésta resista al menos la misma rigidez que la barra original de acero, mientras que es altamente deseable que su peso se reduzca al mismo tiempo que la capacidad de absorción de energía aumente.

De la comparativa con los análisis computacionales de elementos finitos, se puede concluir que, usando el compuesto Twintex, en vez del acero, para barras de protección lateral de impacto, las características de respuesta de la barra frente al impacto se mejoran considerablemente y en consecuencia aumenta el nivel de seguridad de los pasajeros.

Cuando se busca amentar la rigidez y resistencia de la estructura, minimizar el peso y maximizar la absorción de energía, el uso de materiales compuestos tiene una clara ventaja sobre las tradicionales estructuras de acero. Sin embargo, los altos costes de fabricación de los elementos estructurales hechos de materiales compuestos impiden su aplicación generalizada en grandes producciones en serie de coches, y los limitan a su aplicación en coches de alta gama.

Las previsiones futuras se basan en la declaración de que los materiales compuestos se emplearán cada vez más y se ampliarán a la producción en serie cuando se alcance una reducción significativa de costes, especialmente simplificando los complejos procesos de fabricación. Sin duda esto supondrá un hito dentro del área de desarrollo de los materiales compuestos.

2.4 Propagación de las grietas en elementos tubulares

Por último se hace referencia al artículo de David W. Palmer et ál [9], del departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Católica de América, Washington. En él se centran

en el estudio de la propagación de las grietas en elementos tubulares de sección cuadrada de material compuesto, y se analizan las tendencias de fallo del material.

El fenómeno de propagación de fractura en barras de sección rectangular de pared delgada, de material compuesto, ha sido observado en barras sometidas a flexión. En este modo de fallo, único para los materiales compuestos, la propagación de la grieta se refiere a la separación de las fibras horizontales y verticales en las esquinas de la sección transversal. En la parte experimental de esta investigación, las barras de material compuesto se sometieron a flexión en tres puntos hasta producirse una gran deflexión en el centro de la luz de la viga que ocasiona el fallo. Este ensayo mide el comportamiento de la fuerza frente al desplazamiento de la barra. La propagación de la grieta normalmente comienza directamente en el punto de aplicación de la carga y progresa hacia el otro extremo de la barra a medida que aumenta la deformación. En esta investigación se desarrolla un método numérico para simular los ensayos de flexión de 3 puntos. La acción de la propagación se modela usando el programa de elementos finitos LS-DYNA3D. La comparación de los resultados numéricos obtenidos de fuerza versus desplazamiento y los resultados experimentales mostraron que el modelo de elementos finitos recoge el comportamiento total de la barra con suficiente seguridad para demostrar su viabilidad [9].

El comportamiento de los materiales compuestos que han sido dañados ha sido desde hace mucho tiempo un asunto de gran interés de estudio, ya que como se sabe, el daño en las capas de material compuesto puede causar grandes reducciones de la rigidez y resistencia del conjunto. Es conocido que los laminados de material compuesto pueden sufrir deslaminación o rotura de sus fibras como resultado del impacto de una carga. Se han efectuado muchos estudios para predecir la naturaleza y el alcance de varios tipos de daños de impacto, a partir de la influencia de parámetros estructurales como las propiedades de la fibra y de la matriz y la secuencia de apilamiento.

La mayor parte del trabajo que concierne al comportamiento ante el impacto de los laminados compuestos se ha centrado primeramente en los daños locales, e internos, a pequeña escala, causados por el objeto de impacto. Se ha dedicado menos esfuerzo al estudio de grandes daños causados por grandes deformaciones de las estructuras de material compuesto. El comportamiento ante impacto axial de los tubos de material compuesto ha sido investigado por muchos autores: Farley consideró el comportamiento de aplastamiento y la absorción de energía de tubos con secciones elípticas; Czaplicki analizó el comportamiento de impacto de tubos ante grandes ratios de deformación y Kindervater ofrece una revisión completa de los trabajos en este área.

Muchos de los trabajos, hasta la fecha, que conciernen el impacto axial en los tubos de material compuestos, se han centrado en la resistencia a los impactos y en el potencial de sustituir los metales por materiales compuestos en estructuras de protección en automoción. Marnalis consideró escenarios de colisión indirectos a partir del estudio de el comportamiento a flexión de tubos de pared delgada de secciones transversales no circulares. Los experimentos se desarrollaron en tubos de material compuesto que fueron sometidos a carga con un momento simple final hasta el fallo catastrófico. La absorción de energía se consiguió por la fragmentación del material antes que por la deformación plástica.

Los materiales compuestos pultrusionados están siendo considerados para su uso en sistemas de guardarrailes en autovías. Como parte del proceso de determinar la conveniencia de esta aplicación, se tomaron una serie de ensayos para estudiar el comportamiento ante grandes deformaciones de tubos de sección rectangular pultrusionados de material compuesto sometidos a flexión. Las barras fueron sometidas a carga en ensayos de flexión de tres puntos con desplazamiento controlado. Los resultados de los ensayos aparecen en unas curvas donde se representa una fuerza de carga frente al desplazamiento de la barra, obteniendo una medida de la capacidad de carga de la barra así como de su capacidad de absorción de energía. Los ensayos cuasiestáticos son una herramienta muy útil en el diseño de guardarrailes porque proporciona un orden de magnitud para estimar el verdadero comportamiento ante el impacto del raíl. Este estudio describe el método experimental usado en el ensayo y se centra en los resultados de una barra con configuración simple. También se compara con una simulación numérica de un ensayo de tres puntos con un programa de elementos finitos, el LS-DYNA3D.

2.4.1 Ensayo Cuasi-estático de barras de sección rectangular

La configuración del ensayo que se realizó en el estudio de David W. Palmer et ál [9], se muestra en la Figura 2.31 y Figura 2.32. Ésta se consigue, montando la barra entre dos secciones de vigas I de acero. Las secciones son de 381 mm de longitud separadas 1905 mm desde el centro, y tienen la designación de sección W6x9. Como se observa en las Figuras 2.31 y 2.32, la barra está restringida elásticamente frente a rotación en sus extremos como resultado del montaje sobre las vigas de sección en I.

El método usado para asegurar la fijación del ensayo se muestra en la Figura 2.32, que mantiene las barras en su posición durante el proceso de impacto. La barra se fija a las vigas amordazándola ante la viga y unas placas de acero. La fuerza de sujeción la proporcionan cuatro pernos perforados en las placas y en el flanco superior de la viga. Para evitar que se rompa la placa, se insertan bloques de madera en el extremo de la barra por debajo de la placa de fijación.

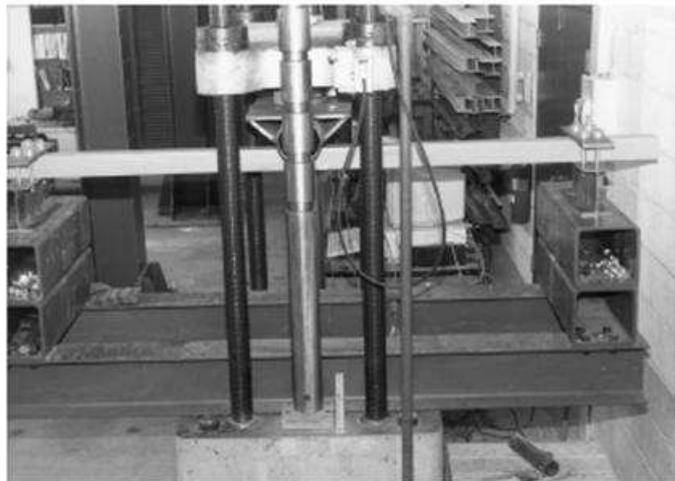


Figura 2.31 Barra de material compuesto pultrusionada montada en un ensayo cuasiestático [9].

La Figura 2.32 también muestra que los apoyos se endurecieron soldando tres placas de 50.8x127x5.25 mm. En aplicaciones para carreteras, los quitamiedos no son reforzados, se atornillan a las barras de sección I en el suelo de la carretera. El ensayo de fijación no simula los postes y se usa en instalación de guardarrailes. Antes, los quitamiedos eran

atornillados directamente al resto de la estructura, como se muestra en la Figura 2.31. Esto hace que en un test de resistencia sea más rígido que un sistema de protección de carretera actual. Los guardarrailes son sometidos a altas cargas de torsión que se podrían observar si se montaran en voladizo. Esto ocasionó muchos fallos prematuros de las barras. Soldando los apoyos a la parte superior de la placa se evitan estos fallos. El aumento de rigidez del test no previene a la barra del desarrollo del mismo tipo de comportamiento que un sistema con postes.

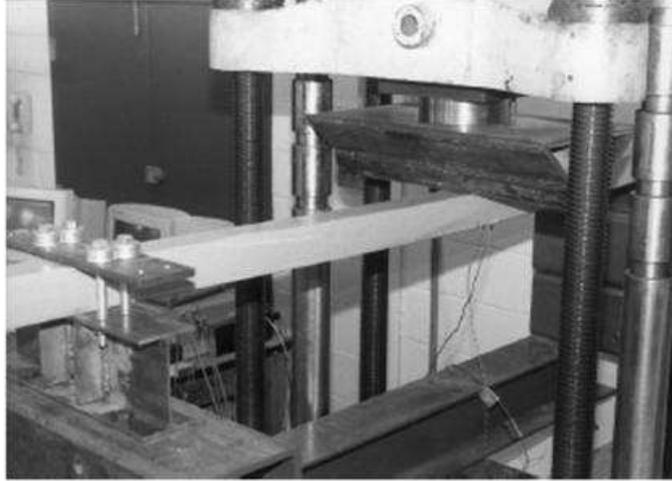


Figura 2.32 Condición de sujeción en el extremo de la barra [9].

El ensayo comienza bajando la cabeza de carga de la Máquina de Ensayos Universal a una velocidad específica, normalmente en un rango de 5 a 10 mm/min, y registrando la fuerza aportada por la célula de carga. En la actualidad se usan barras de distintas secciones transversales, pero en este ensayo se centró en una configuración de barras pultrusionadas de 76,2 mm sección cuadrada, de fibra de vidrio reforzada en matriz vinil éster con 6.25 mm de espesor de pared.

Analizando todos los resultados de ensayos recogidos, se observa que la curva fuerza-deformación de cada barra sigue una tendencia de rígida-flexible-rígida. La primera fase de respuesta de la barra es elástica, produciendo una relación positiva y lineal entre la fuerza de carga y la deformación de la barra. Posteriormente las probetas de ensayo, muestran una drástica reducción de rigidez que culmina la fase elástica. Esta repentina pérdida de rigidez es el resultado de la rotura del material pultrusionado en las esquinas de la sección de la barra, justo debajo del punto de aplicación de la carga. Después de esta pérdida inicial de rigidez, se observa simultáneamente, una deformación plástica de la viga de tipo I y la progresión de la fractura en el material compuesto en una segunda fase. En todos los casos los ensayos continúan hasta que las probetas de material compuesto experimentan la fractura total partiéndose en dos piezas, o hasta que se alcanza el desplazamiento límite de la máquina de ensayos. Los sucesos que tienen lugar durante el ensayo se describen con la ayuda de las Figuras 2.33 hasta la 2.38.

La Figura 2.33 muestra la barra de 76,2 mm inmediatamente después del final de la primera fase de comportamiento rígido. La deformación de la barra es de aproximadamente 6 cm y como se observa en la figura la viga ha sido sometida al mayor daño. Como es común con todas las barras ensayadas en este estudio, la transición de la primera fase rígida a la fase flexible se remarca con una repentina reducción de la energía elástica en la forma de romper del material y su sonido al quebrarse. La ruptura del

material reduce drásticamente la rigidez a flexión de la barra directamente por debajo del punto de aplicación de la carga. Esta pérdida local de rigidez ocasiona un cambio en la sección deformada, e introduce curvaturas afiladas en el material debajo del percutor de carga. Ocurre entonces una separación del material en los extremos superiores de la sección transversal. Las líneas de rotura aún no son visibles, al estar directamente debajo del percutor.

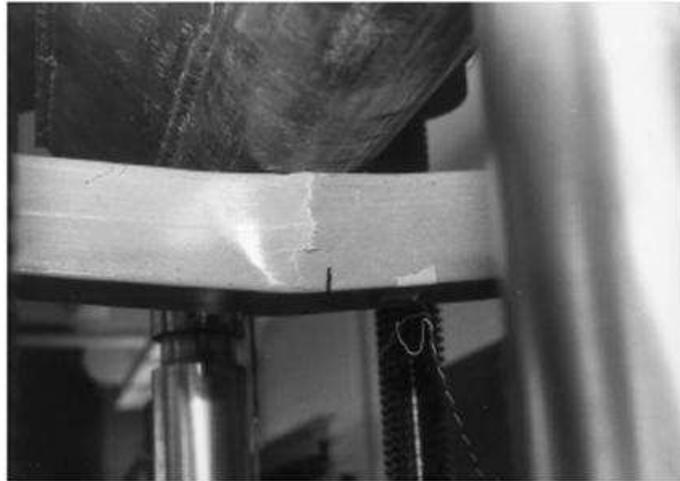


Figura 2.33 Barra la final de la fase rígida [9].

También aparece en la Figura 2.33 la rotura local de las fibras y deslaminación en el miembro vertical visible de la barra. Este daño aparece simultáneamente con la separación del material en las esquinas superiores de la sección transversal, y se presenta en ambas paredes verticales de la barra. El daño es el resultado de la deflexión lateral local de las paredes verticales. La deflexión lateral introduce curvaturas locales de flexión facilitadas por la separación de las paredes verticales de la pared superior horizontal. La rotura de las fibras y la deslaminación de las paredes verticales de la barra aumentan rápidamente con el desplazamiento del percutor, como se muestra desde la Figura 2.34 hasta la Figura 2.36.

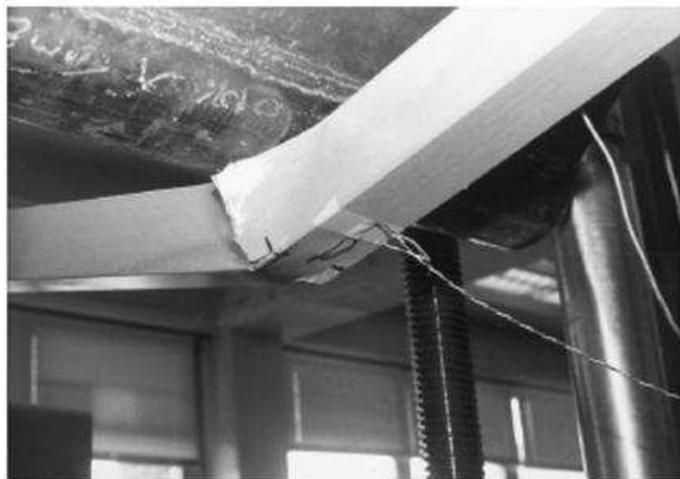


Figura 2.34 Acumulación del daño en las esquinas inferiores de la sección transversal en la zona de impacto [9].

A medida que continúa el avance del percutor, comienza a observarse un patrón de daño único en las barras pultrusionadas de sección rectangular de pared delgada. En la

Figura 2.34 se observa la acumulación local del daño en las esquinas inferiores de la barra por debajo del percutor. Con el continuo desplazamiento de la cabeza de carga y la acumulación del daño, la pared horizontal inferior se separa de las verticales. Las paredes verticales ahora se deterioran rápidamente por debajo de la cabeza impacto con avance continuo y la pared horizontal inferior comienza a rasgarse, separándose de las paredes verticales. La acción de propagación de la fisura es paralela a la de los miembros verticales de la barra y ocurre cerca de las esquinas. La acción de rotura ahora llega a ser el modo de daño predominante y comienza a lo largo de la longitud de la barra a medida que avanza el percutor. El patrón de daño se muestra en la Figura 2.35. Este tipo de fallo se observa en barras de sección rectangular sencillas y de múltiples células y es el modo predominante de daño que se observa en ambos casos.

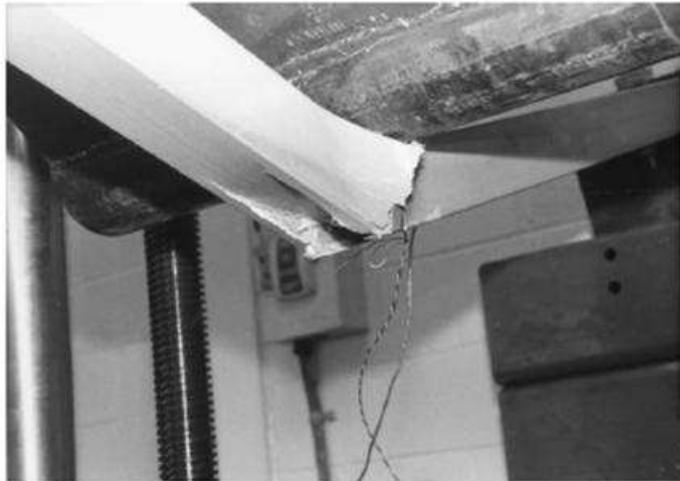


Figura 2.35 Agrietamiento [9].

La Figura 2.36 muestra la progresión continuada de la acción de agrietamiento y el deterioro de las paredes verticales de la barra. Como muestra la Figura 2.36, a medida que avanza el percutor la capacidad de carga de la barra se desplaza a las paredes horizontales. Este tipo de fallo es particularmente útil en aplicaciones como guardarrailes ya que las restantes partes de la barra quedan intactas y aun son capaces de contener al vehículo colindante. En la Figura 2.37, la pared horizontal inferior se rompe, al alcanzar aproximadamente una deflexión de unos 36 mm.



Figura 2.36 Agrietamiento continuo y deterioro de las paredes verticales [9].

También se dan casos en los que aparecen grietas muy pequeñas. Sin embargo estas observaciones están restringidas a barras de pared delgada. Basándose en las observaciones del ensayo, la existencia y ausencia de daños por grietas parece ser una función del espesor de las barras, ya que se observan menores grietas con espesores de pared mayores. Esto sugiere que, a partir de un cierto ratio de sección transversal frente a espesor de pared, el comportamiento de agrietamiento podría perderse completamente, resultando un fallo catastrófico simple en vez de un fallo progresivo de la barra.

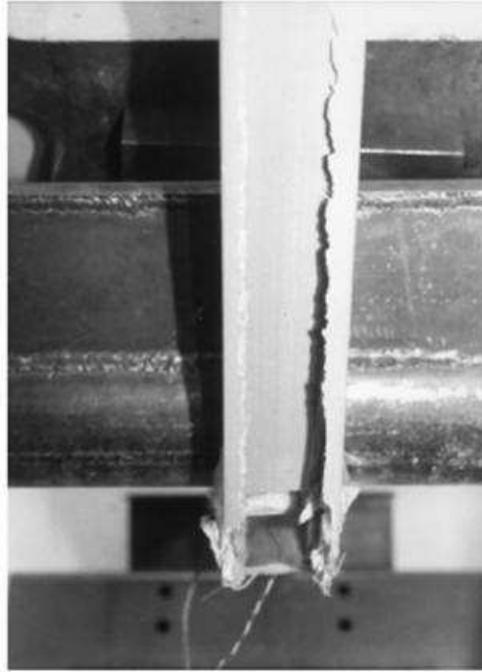


Figura 2.37 Fallo de la pared horizontal inferior [9].

2.4.2 Análisis de los elementos tubulares mediante elementos finitos

Un código explícito de elementos finitos, como el LS-DYNA3D, es ideal para modelar un ensayo cuasi-estático de flexión de tres puntos, ya que estos ensayos implican deformaciones muy grandes y fallos de material progresivos con respuesta no lineal. La porción numérica de este estudio considera una barra con una sección cuadrada de 76.2 mm, 6.25 mm de espesor de pared y una longitud de 1905 mm. Estas dimensiones corresponden a las barras de la Figura 2.31 a la Figura 2.38. La Figura 2.39 muestra el mallado de elementos finitos del estudio de David W. Palmer et ál [9].

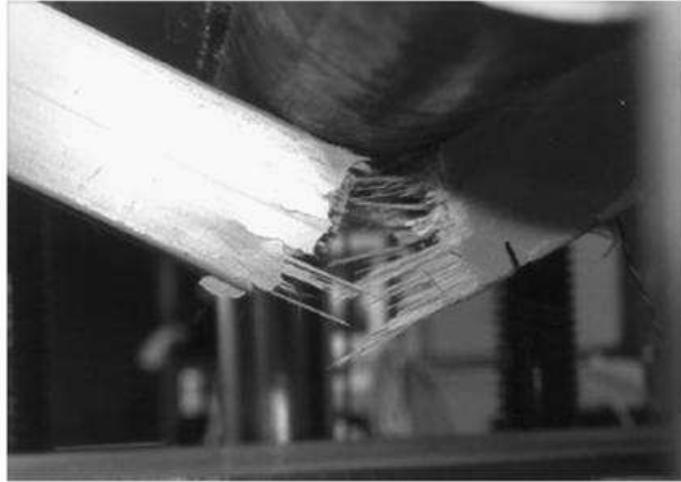


Figura 2.38 Fallo completo de la barra [9].

La barra se fija a las vigas en los puntos de soldadura. El modelo de vigas I tiene las propiedades geométricas y del material de las vigas, usadas en la configuración de los ensayos de las Figuras 2.31 y 2.32. Las constantes elásticas del material compuesto las proporcionó el fabricante de las barras de ensayo, y se muestran en la Tabla 2.6. La cabeza de carga se representa como un tubo rígido de 76,2 mm de diámetro. La simulación comienza después de especificar el ratio de desplazamiento para la cabeza de carga y se fija en 360 mm. Se usan distintos valores de velocidad de impacto.

El reto en modelos ajustados de grandes deflexiones, en ensayos de flexión de tres puntos de barras de sección cuadrada, radica en la recogida de las desviaciones del fenómeno de agrietamiento. Para producir este comportamiento en LS-DYNA3D, la barra de sección cuadrada se modela como un conjunto de cuatro capas planas, simples, elásticas, de material ortotrópico, unidas en los bordes. Las tiras planas y las vigas se modelan usando un modelo de cuatro nodos de elementos tipo placa. El código LS-DYNA3D permite la simulación de los puntos de soldadura, que se usan para conectar las tiras en la formación de la barra. El punto de soldadura se modela como una pequeña barra rígida que conecta dos nodos. La barra es rígida en el sentido de que las rotaciones y desplazamientos de los nodos están rígidamente restringidas. De todos modos, se puede especificar una fractura frágil de la barra. Es la opción de fractura frágil la que permitirá al modelo capturar la rotura repentina del material por debajo de la cabeza de carga a medida que avance la grieta a lo largo de la longitud de la barra. En el modelo corriente, la longitud del punto de soldadura se fija en 1 mm. El fallo del punto de soldadura está gobernado por la siguiente relación:

$$\left(\frac{f_n}{S_n}\right)^N + \left(\frac{f_s}{S_s}\right)^M \geq 1 \quad \text{Ecuación 2.2}$$

donde f_n y f_s son las fuerzas normal y tangencial en la soldadura, y S_n y S_s las fuerzas normal y tangencial de rotura en los puntos de soldadura. En la Ecuación 2.2 se impondrá un fallo elíptico que se ajustará al variar los exponentes N y M. Ambos parámetros se consideran igual a uno en este estudio.

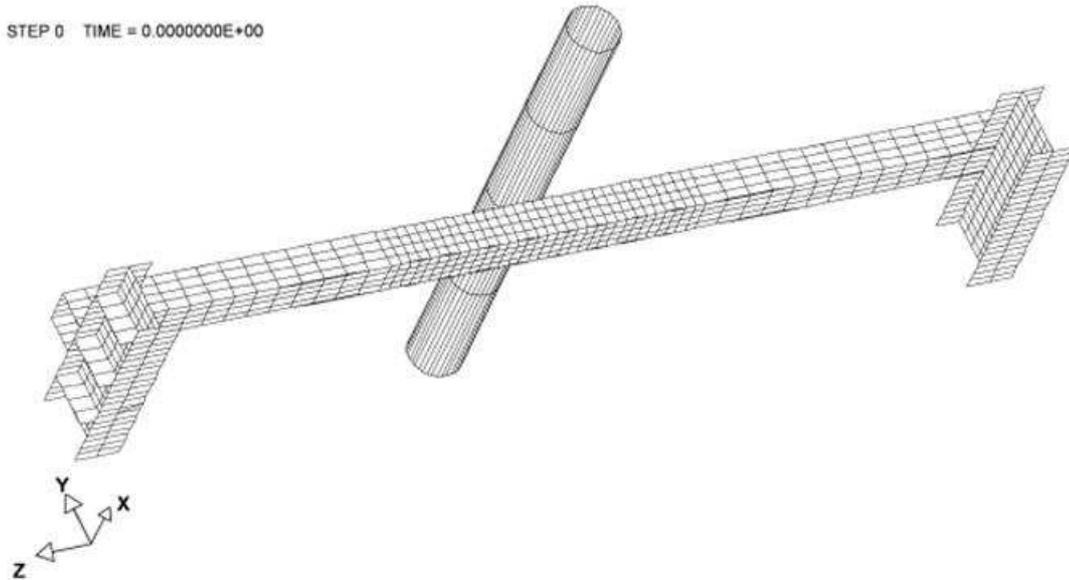


Figura 2.39 Mallado de elementos finitos [10].

La estimación de los parámetros S_n y S_s se basa en los valores de resistencia del material proporcionados por el fabricante de las barras y se calcularon como indica la Ecuación 2.3:

$$S_n = \frac{Y_{lt}}{q} \quad S_s = \frac{T_{lt}}{q} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

donde Y es la resistencia del material en dirección transversal a la dirección de la fibra, T es la resistencia a cortadura del material, l es la longitud de la barra sobre la que se efectúa el cálculo, t es el espesor de la pared y q es el número de nodos a considerar. Los valores de Y y T usados en este estudio se muestran en la Tabla 2.6.

E_{xx}	20.69 GPa
E_{yy}	6.89 GPa
G_{xy}	2.89 GPa
ν_{xy}	0.12
Y	0.055 GPa
T	0.041 GPa
ρ	$1.94 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$

Tabla 2.6 Constantes elásticas del material compuesto usado en la simulación [9].

2.4.3 Comparación de resultados

El objetivo de la simulación numérica en el estudio de David W. Palmer et ál [9] es determinar si un código de elementos finitos específico como el LS-DYNA3D puede ser usado para simular ensayos de flexión cuasi-estáticos. El beneficio de usar un código radica en la capacidad para modelar problemas variables en el tiempo en los que hay degradación de material. La desventaja de usar un código de elementos finitos en modelos estáticos o cuasi-estáticos de carga es el excesivo tiempo de ejecución de los programas. En esta simulación del estudio de David W. Palmer et ál [9], se consideran cuatro valores de ratios carga-desplazamiento para unas velocidades de 5, 50, 100 y 500

cm/s. Estos ratios se consiguen en unos tiempos de ejecución de 50, 4, 2.5 y 0.5 horas respectivamente con un Pentium Pro con 64 Megabytes de RAM. La fuerza de la célula de carga frente al desplazamiento de la misma se representa como salida del programa LS-DYNA3D para los ratios de desplazamientos anteriores y se muestra en las Figuras 2.40 hasta la 2.43, respectivamente. La cabeza de carga infiere monitorizando las fuerzas de reacción verticales por debajo de los puntos de soldadura. El desplazamiento de la cabeza de carga se calcula multiplicando el ratio de desplazamiento por el tiempo transcurrido. Las Figuras 2.40 a 2.43 muestran también los datos de fuerza experimental y de desplazamiento tomados del ensayo cuasi-estático de la barra. La velocidad del percutor de impacto en el ensayo experimental fue de 5 mm/min.

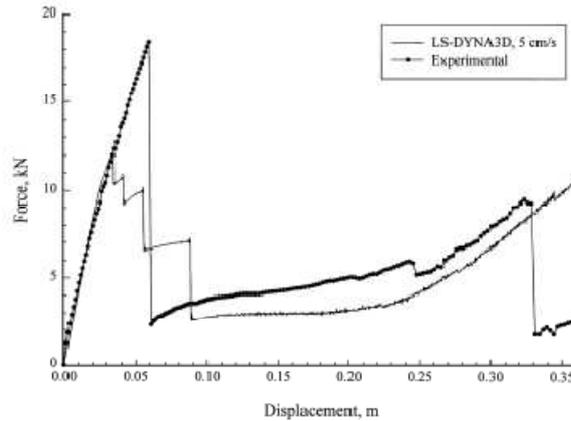


Figura 2.40 Fuerza del percutor frente a desplazamiento para $v = 5$ cm/s [9].

Las gráficas de la Figura 2.41 y Figura 2.42 muestran que las velocidades de carga de 50 y 100 cm/s producen los resultados que más se asemejan a los datos del ensayo. Cada curva fuerza-desplazamiento muestra una gran reducción de rigidez a aproximadamente 0.06 m del desplazamiento del percutor. Estas repentinas pérdidas de rigidez son resultado de la rotura de los puntos de soldadura a lo largo de las esquinas superiores de la barra, justo debajo de la aplicación de la carga. La extensión y la localización de la división que se observa en la animación post procesada, en cada lado de la cabeza de carga, concuerda con lo observado en el experimento.

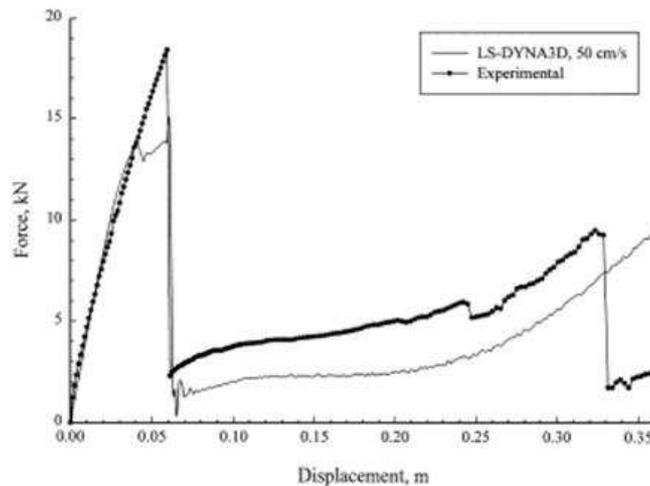


Figura 2.41 Fuerza de la célula de carga frente a desplazamiento para $v = 50$ cm/s [9].

Para ambas velocidades de 50 y 100 cm/s, se observa una menor pérdida de rigidez antes de la gran reducción drástica, a aproximadamente 0.04 m de recorrido de la célula de carga, como se muestra en las gráficas de la Figura 2.41 y Figura 2.42. En ambos casos, estas reducciones de rigidez son causadas por el pandeo de las paredes verticales de la barra justo debajo de la cabeza de carga. Como se observa en las Figuras 2.41 y 2.42, esta pérdida inicial de rigidez no se observa en el experimento. Se aprecia que los puntos de soldadura se rompen progresivamente a medida que avanza el percutor y se pasa la zona de fuerte caída de rigidez, y para los casos de 50 y 100 cm/s la grieta ocurre solo a lo largo de las uniones de los puntos de soldadura superiores. Con respecto a esto, los casos de 50 y 100 cm/s son inconsistentes con las observaciones en el laboratorio, ya que en éstas, las grietas se encuentran tanto en la parte superior de la barra como en la inferior, siendo la parte externa de la misma la zona donde más daño se produce.

Con la menor velocidad (5 cm/s) se produjo una pérdida de rigidez de forma más gradual, con cada sucesiva reducción correspondiente a pequeñas roturas en los puntos de soldadura. Las carreras a 5 cm/s y las de 50 y 100, son similares en la forma en la que los puntos de soldadura rompen en grupo, en vez de roturas individuales secuencialmente. Las tres velocidades más pequeñas son claramente diferentes a la hora de considerar el número y el grado de las caídas de rigidez. Sin embargo, los ratios de ganancia de rigidez, que tienen lugar después de las caídas de rigidez iniciales, son bastante similares. Otra semejanza para las tres velocidades menores es que casi todos los avances de la grieta se dan a partir de los puntos de soldadura superiores, lo que concuerda con las observaciones experimentales.

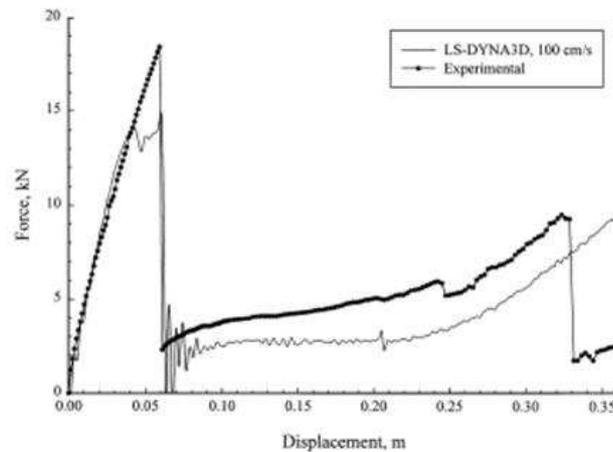


Figura 2.42 Fuerza del percutor frente a desplazamiento para $v=100$ cm/s [9].

También se aprecia una ligera cantidad de grietas a lo largo de las esquinas inferiores en las tres velocidades lentas, pero solo al final de la simulación las deflexiones son mayores a 30 cm. Solo en la carrera más rápida, a 500 cm/s, se produce una cantidad significativa de grietas a lo largo de las esquinas inferiores. Aunque el gráfico de fuerza frente a desplazamiento de la célula de carga para la mayor velocidad es muy inestable, el comportamiento de la grieta en este caso es cercano al observado en el experimento.

Resulta evidente, viendo desde la Figura 2.40 hasta la 2.43, que la respuesta de la barra es altamente dependiente del ratio de desplazamiento de la cabeza de carga. Concretamente, las Figuras 2.40 hasta la 2.43, muestran que a medida que la velocidad del percutor aumenta, los efectos dinámicos sobre las barras se hacen más pronunciados. Esta tendencia resulta de la relación inversa de proporcionalidad entre la velocidad de impacto

de la carga y el tiempo en el que se está aplicando la carga. A medida que el tiempo de aplicación de la carga, que corresponde al tiempo de simulación del evento, se aproxima al periodo de la frecuencia natural más baja del sistema estructural, los efectos inerciales se hacen más evidentes. Los efectos dinámicos se hacen más evidentes en las Figuras 2.40 hasta la 2.42, que muestran como a medida que aumenta la velocidad de la célula de carga, se requiere un tiempo adicional para las fluctuaciones de la fuerza resultantes de los puntos de soldadura al romperse. Esto es particularmente visible cuando se comparan los resultados de la Figura 2.41 y la Figura 2.42 en el rango de desplazamiento de 0.06 a 0.10 m. Todos los resultados de las Figuras 2.40 hasta la 2.43 se obtienen después de un filtrado a 500 Hz en el post procesador del programa LS-DYNA3D.

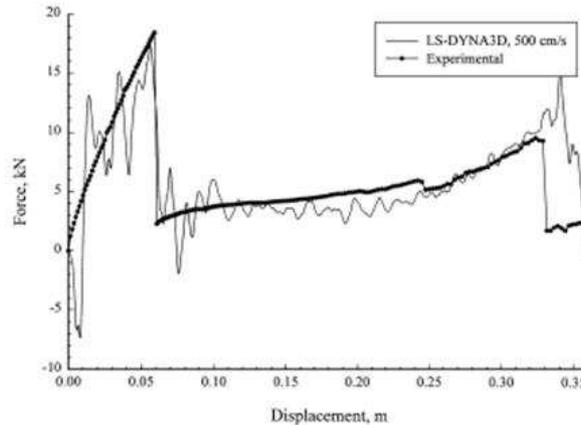


Figura 2.43 Fuerza del percutor frente a desplazamiento para $v = 500$ cm/s [9].

Existe una discrepancia fundamental en el modo en que las condiciones del modelo se aproximan a las del experimento, especialmente mirando la velocidad de la célula de carga, el comportamiento fuerza-desplazamiento resultante no muestra una tendencia a converger a los resultados experimentales. Debe subrayarse que solo se completó una carrera experimental, y que las constantes elásticas usadas en la simulación fueron suministradas por el fabricante. También los datos fueron recogidos en intervalos de 5 segundos, durante la investigación experimental, lo que impidió la recogida de pequeñas fluctuaciones en la cabeza del percutor.

En este estudio de David W. Palmer et ál [9], se ha identificado experimentalmente un modelo de daño único de una fractura en barras de pared delgada y sección transversal cuadrada. Este comportamiento es beneficioso en el sentido que la estructura es capaz de absorber energía de impacto en forma de separación del material. Esto tiene una especial relevancia derivándolo a aplicaciones en guarda raíles ya que la barra impactada conserva su capacidad de desarrollar el campo tensional necesario para contener el vehículo al impactar.

El objetivo del modelado numérico en este estudio es examinar la aplicabilidad de un código de elementos finitos al modelado de ensayos cuasi-estáticos en barras. Para evitar excesivos tiempos de ejecución, se eligen ratios de carga que sean mayores que los ratios experimentales. En un aspecto cualitativo, el modelo recoge el comportamiento de agrietamiento observado en el laboratorio, a pesar de que los patrones de rotura no fueron consistentes a lo largo de las cuatro simulaciones. Además el comportamiento fuerza-deformación se recogió cualitativamente para las velocidades de 50 y 100 cm/s.

Los resultados numéricos de este estudio son preliminares. Se requieren estudios adicionales para que los resultados generados por el programa LS-DYNA3D sean completamente entendidos. Entre las recomendaciones para futuros trabajos está el evaluar independientemente las propiedades del material, y completar con investigaciones experimentales adicionales, con datos tomados con pequeños intervalos de tiempo. Los avances computacionales futuros girarán en torno a clarificar el efecto de los cambios en la densidad del mallado y la velocidad de la célula de caga en los resultados de la simulación. También se considerará el efecto de cargas de tipo impulso aplicadas en la barra por fractura frágil de los puntos de soldadura, así como los efectos de variar la longitud de los puntos de soldadura, y los parámetros de fractura N y M.

Todos los estudios presentados en este capítulo coinciden en afirmar que, con el empleo de materiales compuestos se consiguen valores similares de rigidez, y mayores valores de absorción de energía, en comparación con los metales.

Como se ha visto, existen diversos estudios sobre comportamiento ante impacto de elementos tubulares de diversas secciones, sin embargo, existen pocos estudios realizados sobre el comportamiento frente impacto de elementos tubulares de sección circular de materiales compuestos. De ahí, la especial importancia del presente documento.

Capítulo 3

Diseño del útil para ensayos de flexión de tres puntos para estructuras tubulares de sección circular

Como se expuso anteriormente, para el estudio del comportamiento mecánico de barras de protección de impacto lateral, es preciso someter a las barras (probetas a ensayar) a ensayos como el de flexión de tres puntos. A partir de los resultados experimentales del mismo, se obtiene información acerca del grado de deformación de las barras, la energía absorbida durante el impacto, la fuerza máxima soportada por el elemento estructural, la velocidad y tiempo de impacto...

En concreto, para este estudio del comportamiento frente al impacto de elementos tubulares de material compuesto, se desarrollan dos tipos de ensayos de flexión de tres puntos sobre elementos tubulares de sección circular de fibra de carbono. Primero unos ensayos de impacto (dinámicos), y posteriormente ensayos residuales (estáticos). Los dinámicos se realizan en una Torre de Caída, y los estáticos en una Máquina de Ensayos Universal, por lo tanto será necesario la determinación de dos conjuntos de útiles.

Éstos deberán garantizar la estabilidad de la probeta y soporte, evitando las vibraciones de la probeta durante el impacto, y además, en el caso de los ensayos en la Torre de Caída, el tamaño del útil debe permitir su colocación en la cámara de la Torre.

3.1 Requisitos del ensayo

La configuración básica de un ensayo de flexión en tres puntos, requiere:

- En primer lugar, asegurar tres únicos puntos de contacto en las probetas de ensayo. Para ello, los útiles de sujeción de las barras están dotados de un rodillo cilíndrico, en caso de los útiles del ensayo estático, o de un radio de acuerdo en los ensayos dinámicos, que sirve de apoyo en cada extremo. El percutor (macho de impacto) en ambos ensayos también posee una geometría de punta semiesférica, lo que asegura el contacto con la probeta en un solo punto (ver Figura 3.1).



Figura 3.1 Detalle del percutor de impacto para los ensayos dinámicos y estáticos.

- La distancia de separación entre apoyos se tomó de 430 mm tanto para los ensayos dinámicos, como para los estáticos, como se muestra en las Figura 3.5 y Figura 3.6.
- Para evitar el posible desplazamiento o rodadura de la barra (al tratarse de superficies de contacto circulares, es más propenso a deslizarse) sobre el útil, y que pueda salir disparada al aplicarse la carga, se ideó un sistema de sujeción lateral a partir de placas de aluminio con tornillos de punta redondeada.
- Debido al poco espacio que permite para el utillaje la cámara inferior de la Torre de Caída, (ver Figura 3.2), se utilizaron dos tipos de útiles de apoyo (Figura 3.3(b) y Figura 3.4(b)) distintos para los ensayos dinámicos (útil más pequeño) y estáticos. Por lo tanto, se diseñaron y fabricaron también dos tipos de placas de aluminio (4 unidades para cada ensayo).



Figura 3.2 Cámara donde se aloja el utillaje y la probeta en la torre de caída.

Para la realización de los ensayos se contaba prácticamente, con todo el utillaje disponible en los laboratorios de la Universidad, ya que se habían efectuado anteriormente otros ensayos de flexión de tres puntos con otro tipo de estructuras de tipo viga [7]. Fue necesario el diseño de unas placas de aluminio de 6 mm de espesor, para poder acoplarlas a los útiles de sujeción, tanto a los dinámicos, como a los estáticos.

Se escogió el aluminio para la fabricación de las placas por ser un material liviano, barato y que cumplía con las características requeridas de rigidez y resistencia.

También hubo que realizar unos taladros en los útiles de fijación de los ensayos dinámicos, para poder fijar las placas. Se intentó minimizar el número de los mismos para evitar daños internos en el material de los útiles, por ello se aprovecharon los taladros ya existentes en los útiles de los ensayos estáticos (Figura 3.4 (a)). La geometría de los útiles de sujeción finales de los ensayos estáticos y dinámicos, de los dos tipos de placas, así como la de todo el conjunto del utillaje de los ensayos, se incluyen en los planos en los Anexos.

Las placas se fijan a los útiles de sujeción del ensayo dinámico y estático como se muestra en las Figuras 3.3 (b) y 3.4 (b), por medio de tornillos de métrica 5 para los ensayos dinámicos y de métrica 6 para los ensayos estáticos. Para evitar el posible deslizamiento de los tubos sobre los útiles, se le añaden unos tornillos en los agujeros superiores de las placas, de forma que ajusten las barras de fibra de carbono en una posición que impida su deslizamiento.

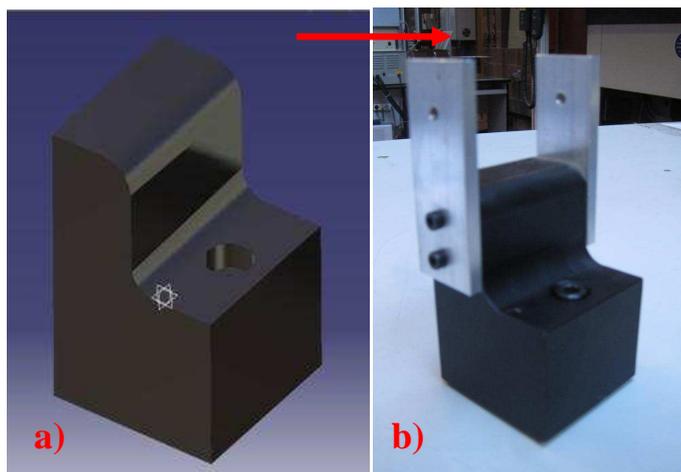


Figura 3.3 Útil de sujeción para los ensayos dinámicos. (a) Útil inicial. (b) Útil modificado con taladros y las placas de fijación.

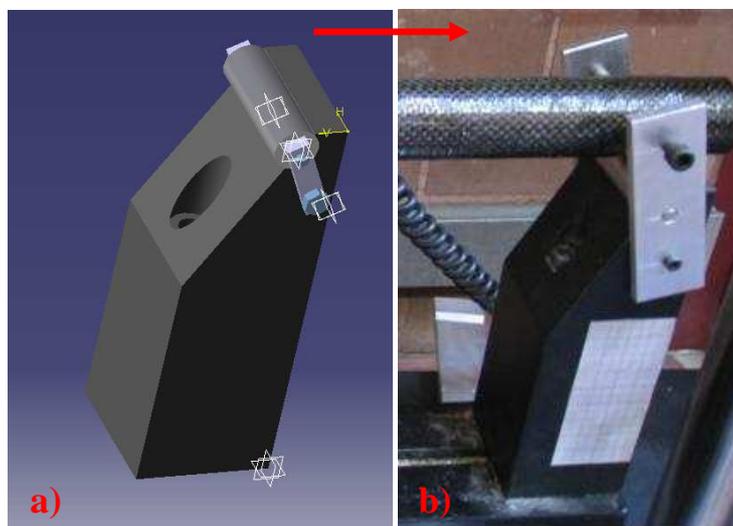


Figura 3.4 Útil de sujeción para los ensayos estáticos. (a) Útil inicial. (b) Útil modificado con las placas de fijación.

3.2 Diseño de los útiles

Para el diseño de las sujeciones laterales se utilizó el programa Catia V5R20, previo estudio de la geometría de los útiles y de las barras. Las restricciones geométricas del diseño fueron:

- ✓ La distancia entre apoyos extremos debe ser igual a 430 mm para los dos tipos de ensayo.
- ✓ El ensayo debe conservar simetría respecto al eje que pasa por donde actúa el percutor.
- ✓ La longitud de los tubos, igual a 480 mm, así como el diámetro exterior de los mismos, comprendido entre 32.1 mm y 31.5 mm para las 30 muestras. Se seleccionó la media, $D_{ext}=31.8$ m para la elaboración de los planos.
- ✓ El resto de restricciones, impuestas por la propia geometría de los útiles ya existentes y por los requisitos de los ensayos expuestos en el apartado anterior.

A continuación se añaden los planos de diseño del utillaje completo para el ensayo dinámico en la Torre de Caída, a partir de su representación de todas sus vistas diédricas, en el sistema americano, en la Figura 3.5.

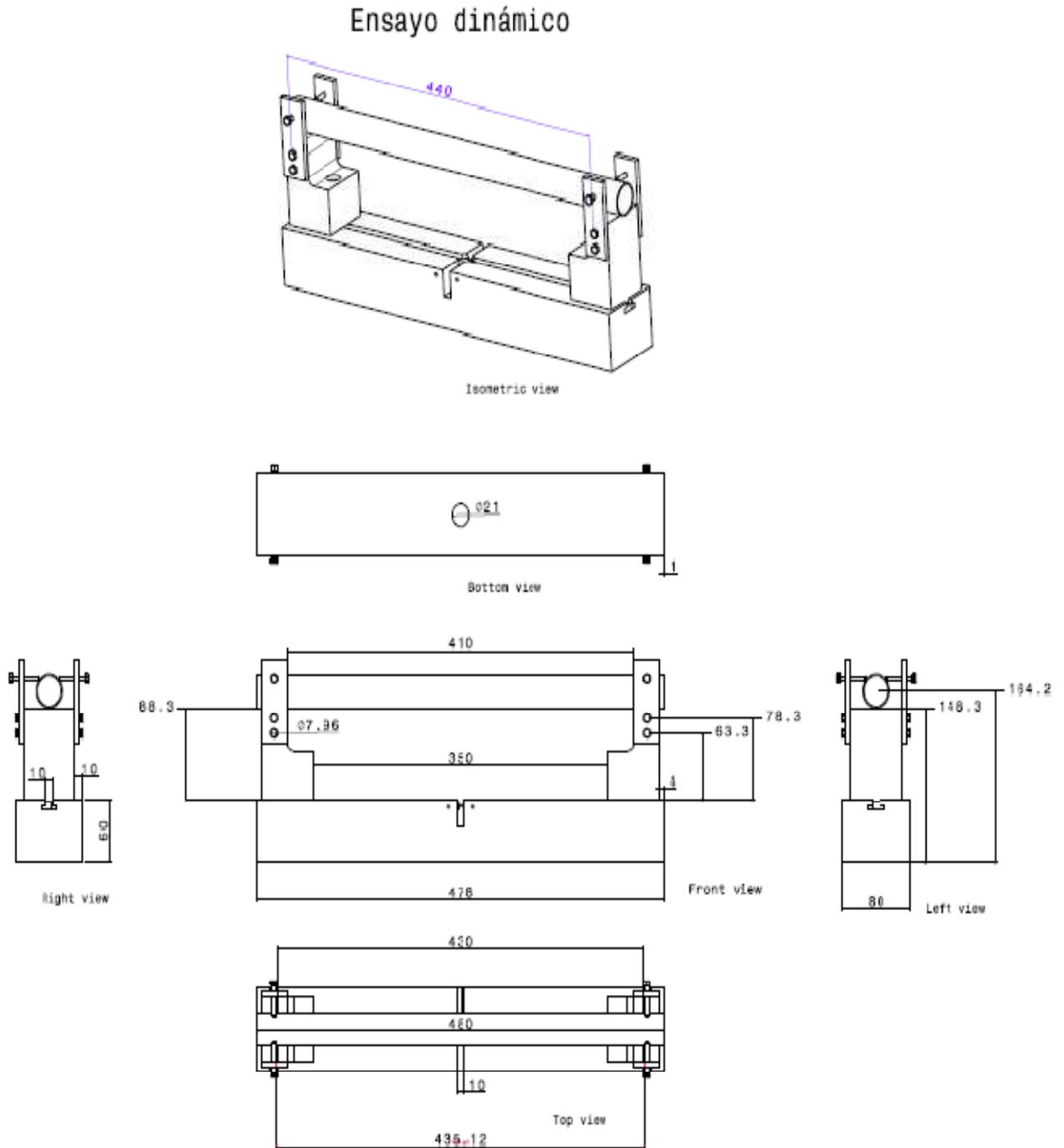


Figura 3.5 Plano de diseño del utillaje completo para los ensayos dinámicos. Cotas en mm.

De forma análoga, se observa en los planos de la Figura 3.6, la disposición de todo el utillaje necesario para los ensayos estáticos en la Máquina de Ensayos Universal.

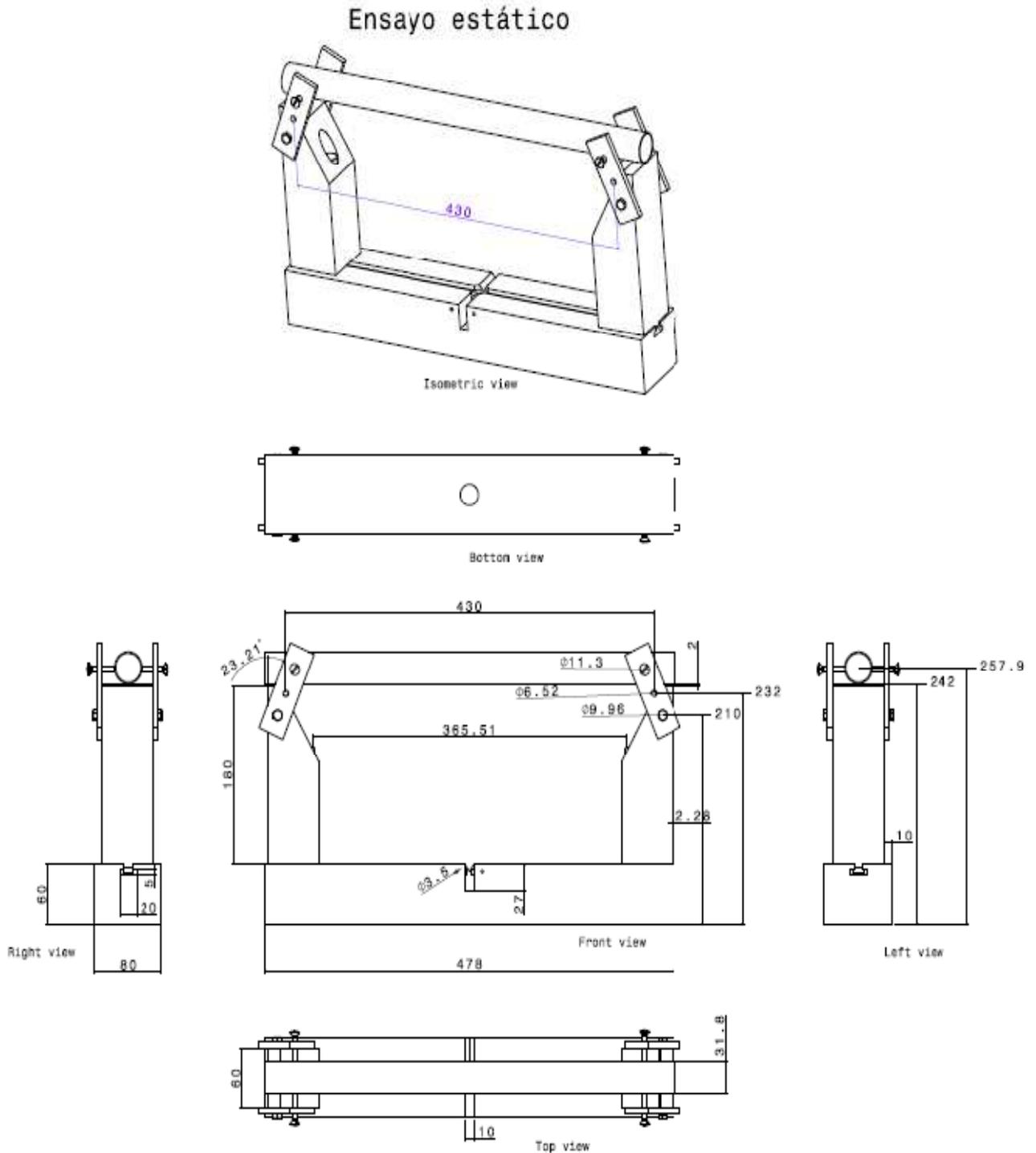


Figura 3.6 Planos de diseño del utillaje completo para los ensayos estáticos. Cotas en mm.

Como se observa en ambas Figuras (Figura 3.5 y Figura 3.6), los útiles de apoyo se fijan al útil base a partir del carril existente en el mismo, lo que permite colocarlo a la distancia requerida. También se utiliza un tornillo pasante que va desde la parte superior de cada útil hasta el carril de la base, para impedir su deslizamiento una vez colocados todos los elementos del utillaje.

Capítulo 4

Procedimiento experimental

4.1 Introducción

En este capítulo se explica el procedimiento para la realización de los ensayos de flexión de tres puntos. Se realizan, como ya se ha indicado, dos tipos de ensayos de flexión de tres puntos, unos dinámicos, en una Torre de Caída, y otros ensayos estáticos en una Máquina de Ensayos Universal.

Los ensayos tanto dinámicos como estáticos consisten en ir aplicando carga progresivamente sobre las barras hasta que se produzca la deslaminación o fallo de las capas, momento en que se soporta la carga máxima. A partir de ese punto, las máquinas de ensayo comienzan a reducir la carga neta y posteriormente acaba el ensayo.

La diferencia entre los ensayos dinámicos y estáticos, reside fundamentalmente en la velocidad de deformación. Los ensayos dinámicos, o a alta velocidad de deformación, se realizan en cortos períodos de tiempo (del orden de milisegundos), mientras que los estáticos, la carga se aplica lenta y progresivamente hasta el punto de máxima resistencia de la barra y luego comienza a retirarse la fuerza, de la misma forma, durando aproximadamente entre 5 y 10 minutos por ensayo.

El procedimiento para la realización de los ensayos que se ha seguido para el estudio de las barras ha sido el siguiente:

- Primeramente se realizaron ensayos dinámicos con energías de 15, 20, 25 y 30 Julios, tomando varias muestras para cada una.
- Posteriormente se realizaron los ensayos estáticos sobre las probetas ya ensayadas dinámicamente de 15, 20, 25 y 30 Julios.
- Finalmente se ensayaron tres probetas de control (no impactadas previamente en ensayo dinámico) en la máquina de ensayos estáticos.

Las probetas de control se usarán para su posterior comparación con las ya ensayadas dinámicamente y estáticamente.

4.2 Muestras de ensayos

El material de las barras de los ensayos del presente Proyecto de Fin de Carrera es fibra de carbono AS4 en matriz epoxi 8552, elaborado por Hexcel Composites S.L. para el I.N.T.A. (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial). Para todas las probetas se emplea un laminado de tipo tejido equilibrado (Tafetán) de 10 láminas con 2 mm aproximados de espesor y 480 mm de longitud. Los tubos de fibra de carbono se muestran en la Figura 4.1.



Figura 4.1 Tubo de fibra de carbono utilizado para los ensayos.

Las dimensiones de los tubos se muestran en plano de la Figura 4.2, sacado de los planos del modelo CATIA.

Tubos de fibra de carbono

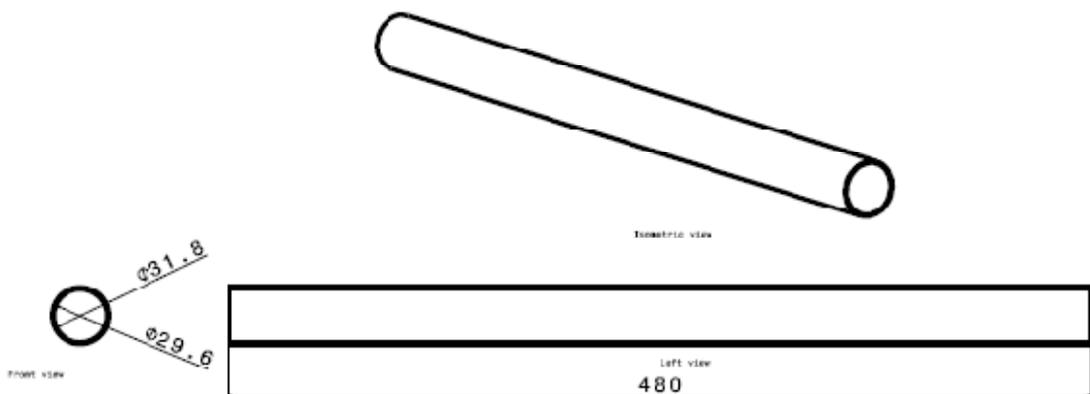


Figura 4.2 Vistas frontal y lateral de los tubos.

La masa de los tubos de fibra de carbono se midió en 174.5 gramos.

4.3 Ensayos de flexión dinámica en tres puntos

Para la realización de los ensayos dinámicos se cuenta con el siguiente equipo:

- Una Torre de Caída de Peso, marca Ceast Fractovis, modelo 6785, con dos compartimentos (superior e inferior).
- En el compartimento o cámara superior, se encuentra el percutor de 5 kN de la Figura 3.1.
- En la cámara inferior se alojan los útiles de sujeción del ensayo, el útil base y sus cuatro placas, junto con los tubos de fibra de carbono como muestra la Figura 3.5.
- La Torre de Caída se encuentra conectada a un PC como explica la Figura 4.3 .



Figura 4.3 Equipo utilizado en los ensayos dinámicos.

- También se dispone de un Sistema de Filmación de Alta Velocidad Photron Ultima Apx RS (ver Figura 4.4), que registra los desplazamientos en la cámara inferior.

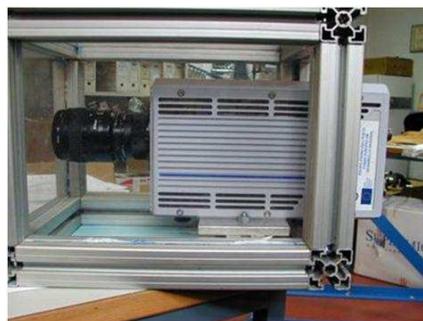


Figura 4.4 Cámara de grabación de alta velocidad para los ensayos en la Torre de Caída.

4.3.1 Procedimiento experimental

El procedimiento para la realización de los ensayos en la Torre de Caída se ha realizado de la siguiente forma:

- Primero se situó el utillaje completo para el ensayo (Figura 3.5) en el interior de la cámara inferior de la Torre de Caída.
- A continuación se introdujeron las probetas de cada ensayo, situándolas de manera que quedaran centradas en el útil, y que apenas hicieran contacto con los tornillos de las placas de fijación.
- Se situó la cámara de alta velocidad en frente del compartimento inferior para poder efectuar las grabaciones de impacto sobre las probetas.
- Se efectuaron los ensayos dinámicos para energías de 15, 20, 25 y 30 Julios, tomando tres muestras para los ensayos de 15,20 y 25 Julios y cinco para el ensayo de 30 Julios de energía de impacto.
- Por un lado se obtuvieron datos de la Torre de Caída y por otro datos de grabación del Sistema de Filmación de Alta Velocidad.

4.3.2 Procesamiento de datos

Los datos recogidos de la máquina de ensayos dinámicos (Torre de Caída) se procesan de la siguiente forma:

En primer lugar, se obtiene del software del sistema de filmación, la grabación de la cámara de alta velocidad, que recoge información del desplazamiento de la probeta y el tiempo en el que ocurre, y se tratan con el programa Photron FASTCAM Viewer (PFV 2.4) como se indica en la Figura 4.5.



Figura 4.5 Programa PFV para el tratamiento de datos registrados con la cámara.

Como se aprecia en la Figura 4.5, a partir del programa se registra el tiempo (current Time) y el desplazamiento en pixeles, en cada punto en que se sitúe el puntero del ratón. Gracias a una regla milimétrica incluida en el percutor, es posible pasar los pixeles a unidades de longitud por medio de una regla de tres.

Con estos datos de desplazamiento y tiempo se obtienen las velocidades de impacto medidas con la Cámara de alta Velocidad, cuyos cálculos se pueden observar en las tablas de los Anexos.

Para la obtención de la velocidad de retroceso (v_R), la cual permite calcular la energía absorbida por la probeta, se tomaron la distancia y el instante desde que comienza a subir el percutor después del impacto (Figura 4.6), hasta que desaparece de la imagen de la cámara.

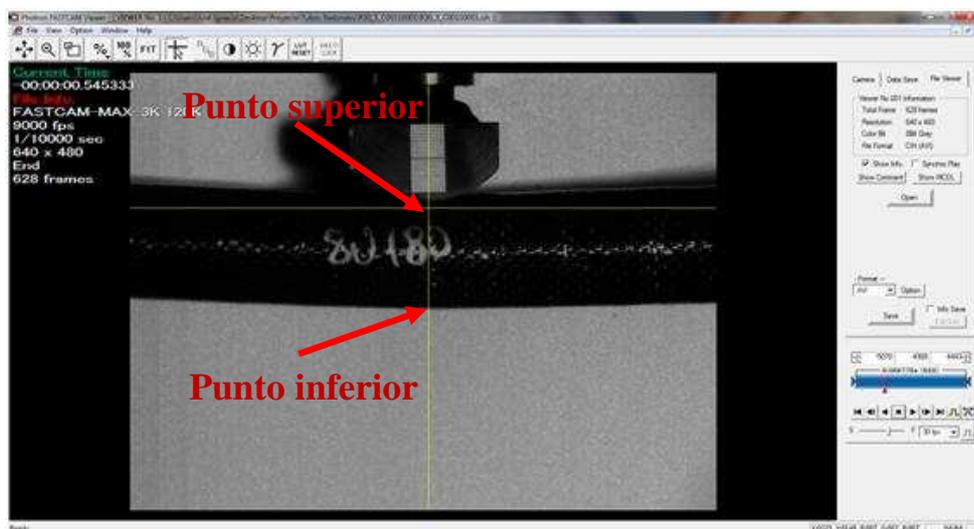


Figura 4.6 Instante de máximo desplazamiento. Puntos superior e inferior.

También se recogieron las medidas del desplazamiento superior e inferior de los tubos, fijándose en la Figura 4.6, así como el tiempo de impacto en cada ensayo, medido como el tiempo en el que el percutor está haciendo contacto con la probeta. Todos los cálculos se presentan en los Anexos.

Por último, se calculan los valores de la energía de impacto, hallados a partir de la Ecuación 4.1:

$$E_{\text{impacto}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2_{\text{impacto}} \quad \text{Ecuación 4.1}$$

Siendo m la masa del percutor e igual a 6,128 kg. También se hallan los valores medios de las energías y velocidades para su posterior representación gráfica.

En segundo lugar, se cuenta con los archivos .txt obtenidos de la Torre de Caída para cada ensayo (R_15_1.txt, R_15_2.txt, etc), que recogen datos con valores de fuerza, energía, velocidad y desplazamiento para cada instante de tiempo. Estos se pasan a unas hojas de cálculo para procesarlos.

Para el cálculo de la energía absorbida en el impacto se utilizaran 3 métodos para su posterior comparación en los resultados. El primer método de cálculo de la energía absorbida (método 1), consiste en utilizar los datos de la cámara de grabación, y aplicar la siguiente fórmula (Ecuación 4.2) :

$$E_{abs} = E_i - E_R = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_i^2 - \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_R^2 \quad \text{Ecuación 4.2}$$

Se halla la energía absorbida como diferencia de la energía de impacto y la de retroceso, donde v_R es la velocidad de retorno del percutor y v_i la velocidad de impacto de la cámara. Los resultados para cada ensayo se muestran en las tablas de los Anexos.

Para el segundo y el tercer método de cálculo de la energía absorbida, se utiliza el programa Kaleidagraph 4.0 y los datos de los ficheros .txt, obtenidos de la Torre de Caída, para la obtención de curvas energía-tiempo. Se escoge la muestra más representativa de cada ensayo en cada método. Se explicará el procedimiento realizado en todas las muestras, para la obtención de la energía absorbida por estos dos métodos. A modo de ejemplo, se muestra a continuación el procedimiento para el ensayo de energía teórica de impacto de 15 Julios.

El segundo método (método 2), consiste en, partiendo de los datos de los ficheros .txt, integrar primeramente la curva de fuerza-desplazamiento de la Figura 4.7 [7].

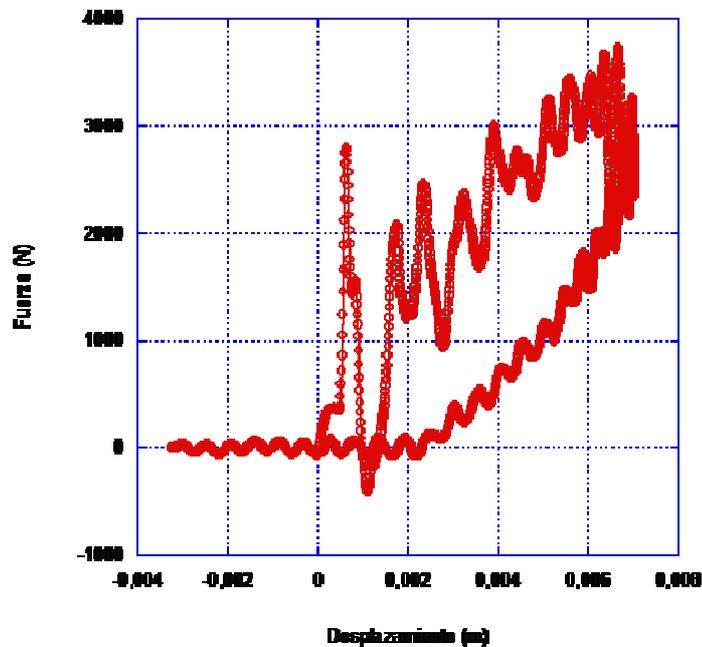


Figura 4.7 Representación de la fuerza frente al desplazamiento con los datos obtenidos de la torre de caída, para el ensayo R15_3.

Con estos datos medidos en el programa Kaleida, se realiza la integral de la curva fuerza-desplazamiento, cuyo resultado es la energía. Representando la nueva columna obtenida de energía frente al tiempo, se obtiene la curva de la Figura 4.8, donde se puede extraer el valor de la energía absorbida para ese ensayo. En este caso se obtiene que $E_{absorbida} = 9.125$ Julios.

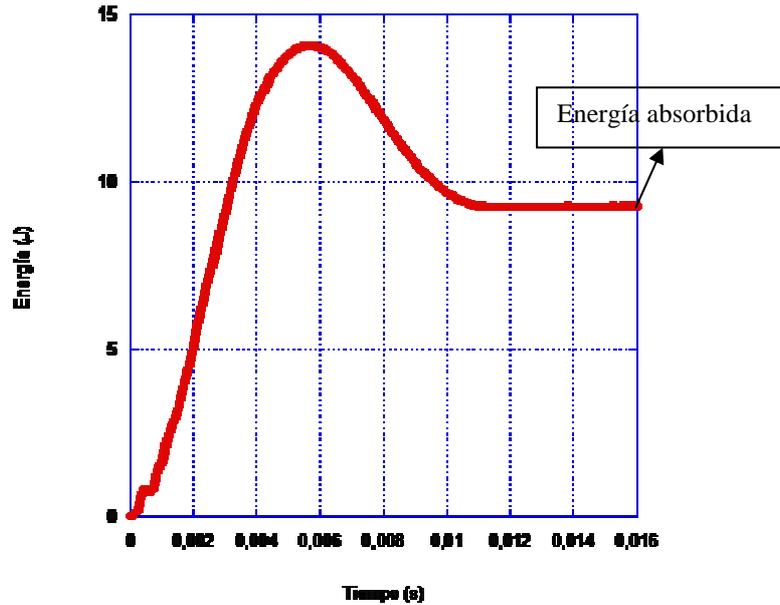


Figura 4.8 Representación de la energía frente al tiempo para el ensayo de 15 Julios.

El tercer método de cálculo de la energía absorbida, llamado método de Integrales sucesivas (método 3), es análogo al anterior, pero se parte de los datos de Fuerza y tiempo, registrados por el percutor instrumentado, para llegar a la curva final de fuerza-desplazamiento, a partir de integrales sucesivas de la fuerza [11].

Primeramente se representa la fuerza frente al tiempo en la Figura 4.9, con los datos obtenidos directamente de la máquina en el archivo R15-3.txt. Como se explica posteriormente, debido al ruido presente en las curvas F-t, se realizará una limpieza de la señal.

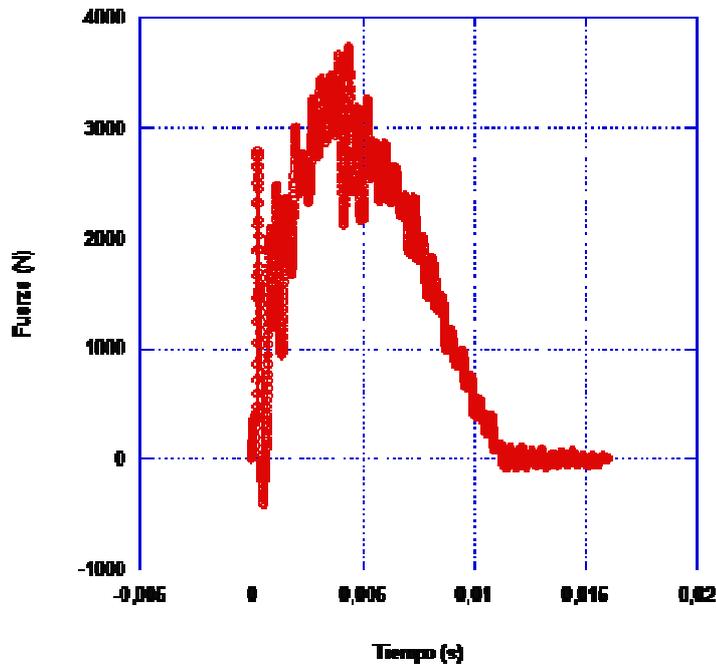


Figura 4.9 Representación de la fuerza frente al tiempo para el ensayo de 15 Julios.

Posteriormente se calcula una nueva columna con valores de aceleración del percutor hallados a partir de los datos de fuerza con la siguiente relación (Ecuación 4.3):

$$a(t) = \frac{F - P}{m} = \frac{F - m \cdot g}{m} \quad \text{Ecuación 4.3}$$

Donde F es la fuerza en el punto de aplicación en Newton, P el peso del percutor en Newton, m la masa del percutor en kilogramos y g la aceleración de la gravedad en m/s^2 . A continuación se representa la aceleración frente al tiempo en la Figura 4.10.

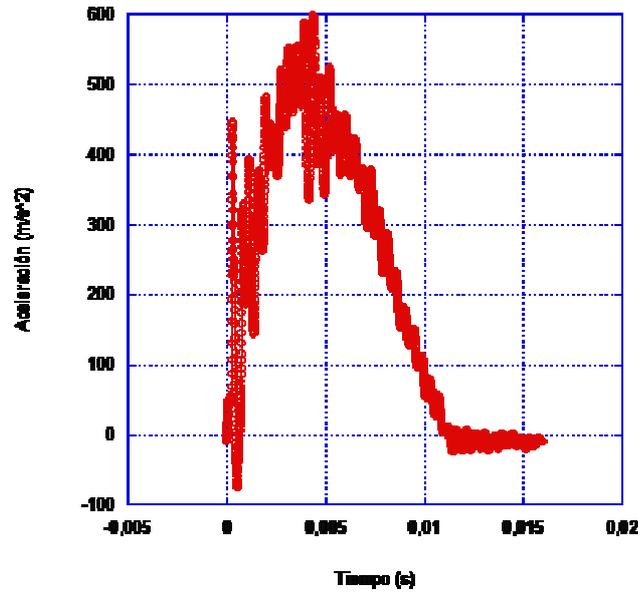


Figura 4.10 Variación de la aceleración en función del tiempo para el ensayo de 15 Julios.

Integrando la aceleración, se puede obtener la velocidad de impacto del percutor, como muestra la Ecuación 4.4

$$v(t) = v_0 - \int_0^t a(t) \cdot dt \quad \text{Ecuación 4.4}$$

Donde v_0 es la velocidad inicial, correspondiente al instante en que comienza el contacto entre probeta y percutor. Para el ensayo de 15 Julios se obtiene el valor de $v_0 = 2.1085$ m/s directamente del fichero .txt. Por lo tanto, integrando la aceleración con el programa Kaleida, se obtiene una columna, que restando a su vez el valor de v_0 , da lugar a la velocidad de impacto. Se representa ésta frente al tiempo en la Figura 4.11.

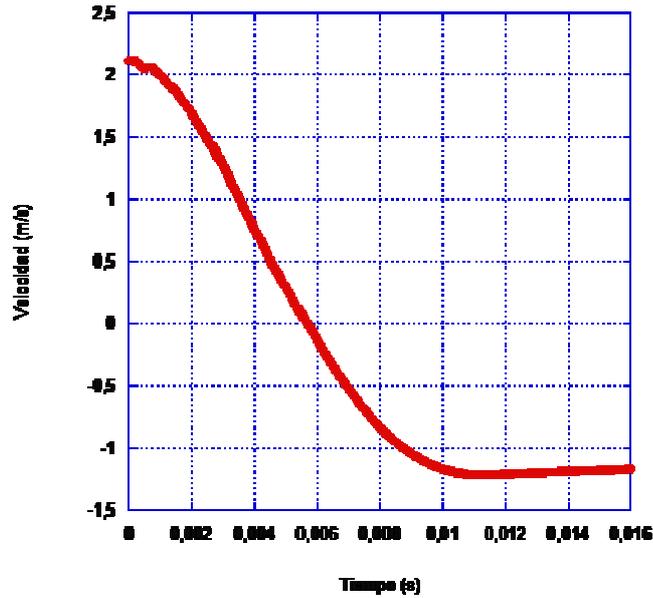


Figura 4.11 Variación de la velocidad de impacto del percutor en función del tiempo en el ensayo de 15 J.

Realizando otra integración consecutiva, a partir de la Ecuación 4.5, se obtiene el desplazamiento de la punta del percutor, $x(t)$, durante el impacto.

$$x(t) = x_0 - \int_0^t v(t) \cdot dt \tag{Ecuación 4.5}$$

En donde x_0 es el desplazamiento inicial, que toma valor igual a cero. La Figura 4.12 muestra el desplazamiento del percutor en función del tiempo.

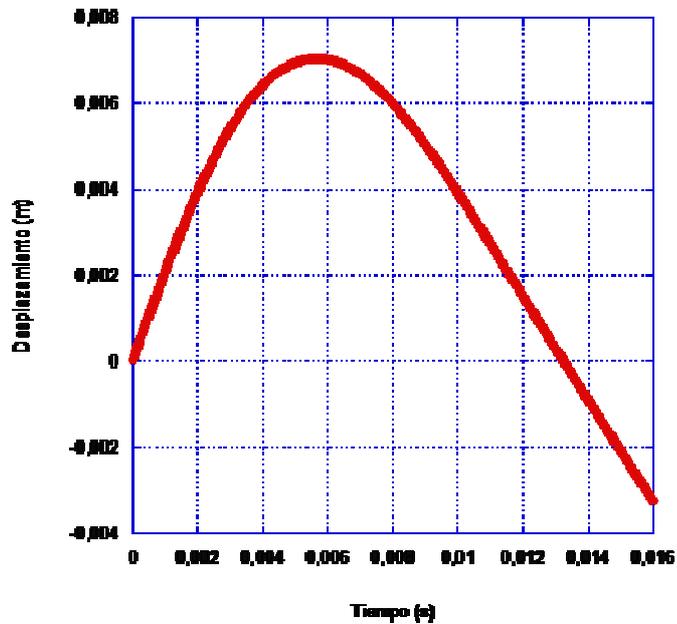


Figura 4.12 Curva desplazamiento versus tiempo en el ensayo de 15 Julios.

A partir de este último desplazamiento hallado ($x(t)$), y de la fuerza del ensayo, se puede construir la siguiente curva fuerza-desplazamiento del material (Figura 4.13).

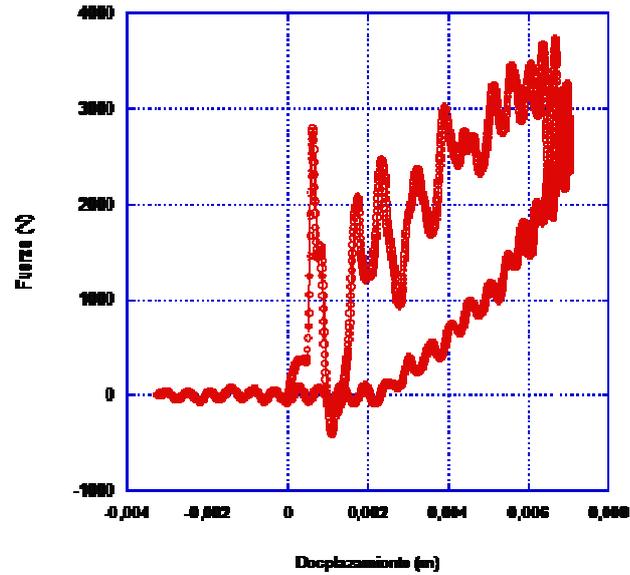


Figura 4.13 Representación de la fuerza del percutor en función del desplazamiento $x(t)$, en el ensayo de 15 Julios de energía de impacto.

Y finalmente, a partir de la curva desplazamiento, al igual que en el método 2, se puede determinar la energía absorbida a partir de la integración numérica de la mencionada curva. El resultado de representar la integral frente al tiempo se muestra en la Figura 4.14.

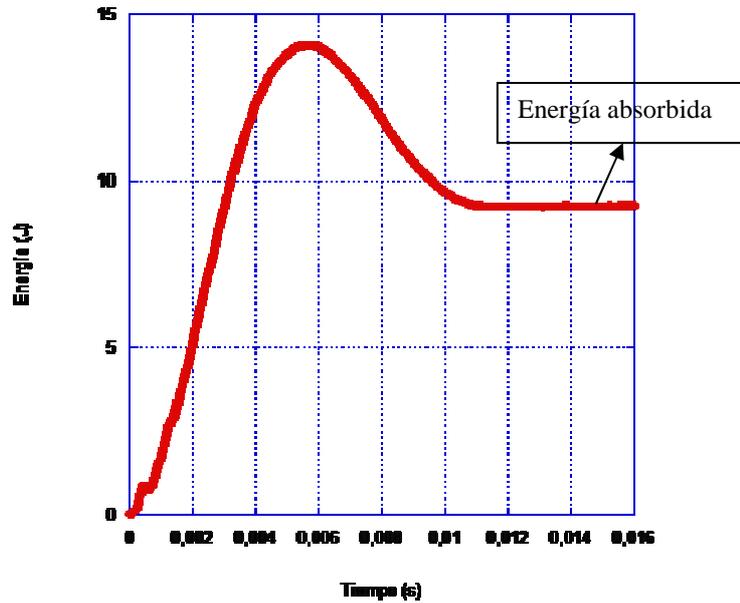


Figura 4.14 Energía frente al tiempo para el ensayo de 15 Julios.

Observando la gráfica, y al extraer el valor de la energía absorbida, se obtiene el mismo resultado que el obtenido mediante el segundo método, es decir, se llega a que la energía absorbida es igual a 9.125 Julios. Esto se comprueba, representando la energía obtenida por ambos métodos frente al tiempo, en la Figura 4.15.

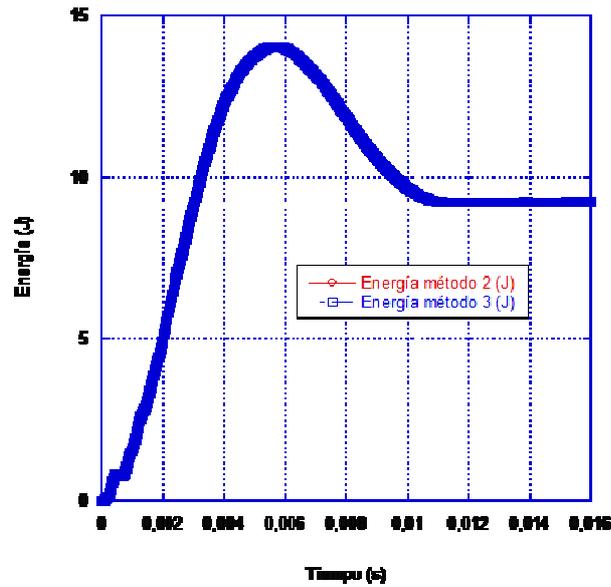


Figura 4.15 Comparación de los dos métodos de obtención de la energía absorbida mediante el programa Kaleida.

Por lo tanto, debido a la coincidencia de las curvas de energía-tiempo por los dos últimos métodos que muestra la Figura 4.15, solo se presentarán en los resultados del capítulo posterior los datos obtenidos por los métodos 1 y 2.

Este proceso se repite para los siguientes ensayos (20, 25 y 30 Julios de energía de impacto) para la obtención de la energía absorbida, y los resultados obtenidos se muestran en las tablas de los Anexos.

4.3.3 Depurado de datos

En los datos extraídos de los ensayos dinámicos, a la hora de representar la fuerza en cada instante, como se dijo anteriormente, se obtienen unos valores muy oscilantes, que se consideran ruido de la gráfica, y son debidos a vibraciones producidas por las frecuencias naturales de la máquina de ensayo. Para el suavizado de la curva se emplea una aproximación con media móvil de periodo 85, obtenida gracias al programa Excel, lo que proporciona una curva más armoniosa (ver Figura 4.16).

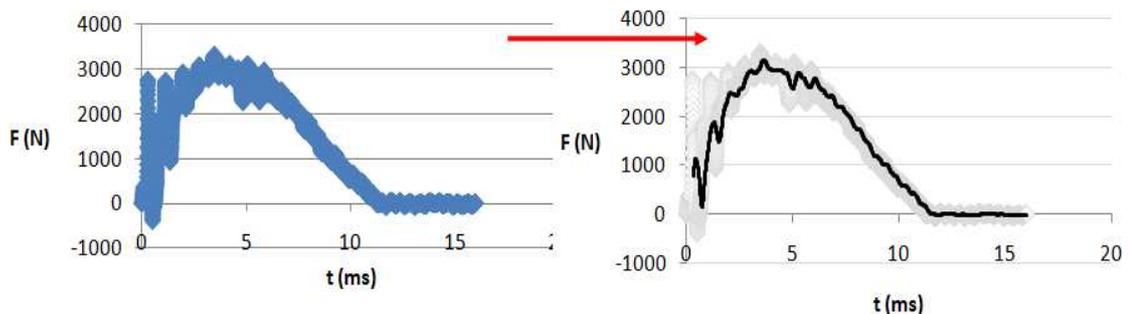


Figura 4.16 Ajuste de los datos a una función de media móvil de periodo 85.

4.4 Ensayos de resistencia residual a flexión

Para la realización de los ensayos estáticos se cuenta con el siguiente equipo (ver Figura 4.17) :

- Una Máquina de Ensayos Universal Instron 8516 con capacidad de 100 kN.
- Un percutor de impacto con célula de carga de 5 kN (Figura 3.1).
- Un extensómetro longitudinal LVDT.
- Dos ordenadores personales (PCs); uno conectado a la Máquina Universal, y otro conectado al sensor LVDT.
- En la Máquina, se sitúa el utillaje necesario para la realización de los ensayos: base del útil, con los dos útiles de sujeción y las cuatro placas de fijación, así como los elementos tubulares de fibra carbono (Figura 3.6).

La velocidad del pistón de la Máquina de Ensayos Universal se fijó en 5 mm/min, y la frecuencia de la toma de datos fue de 10 Hz, tanto para la Máquina como para el sensor LVDT.



Figura 4.17 Equipo utilizado en los ensayos estáticos.

4.4.1 Procedimiento experimental

El procedimiento para la realización de los ensayos en la Máquina de Ensayos Universal fue el siguiente:

- Primero se situó el utillaje completo para el ensayo (Figura 3.6) en la Máquina de Ensayos Universal.
- A continuación se introdujeron las probetas de cada ensayo, situándolas de manera quedaran centradas en el útil, y que apenas hicieran contacto con los tornillos de las placas de fijación.

- Se conectaron ambos PCs a la Máquina y LVDT para la recogida de los datos de los ensayos.
- Se realizaron los ensayos de resistencia residual para probetas cargadas dinámicamente a 15, 20, 25 y 30 Julios y para las probetas de control. Se tomaron tres muestras para las probetas de control y para las probetas ensayadas a 15,20 y 25 J, y una sola muestra para la de 30 Julios, debido a un fallo técnico con los ordenadores.

El ordenador conectado al extensómetro, se utiliza para recoger los datos referidos al desplazamiento del sensor LVDT (del inglés, Linear Variable Differential Transformer: transformador eléctrico variable lineal diferencial), situado por debajo de la barra, y graba las variaciones de tensión que se producen al aplicar la carga (posteriormente se obtiene el desplazamiento con un factor de conversión) en una hoja Excel, como se muestra en la Figura 4.18.

ID	Seconds	Elap	A/D Counts	Millivolts
1	0.1		-27836	-8495.9
2	0.2		-27837	-8495.2
3	0.3		-27836	-8495.9
4	0.4		-27835	-8495.6
5	0.5		-27838	-8495.5
6	0.6		-27835	-8495.6
7	0.7		-27835	-8495.6
8	0.8		-27834	-8495.3
9	0.9		-27835	-8495.6
10	1		-27837	-8495.2
11	1.1		-27834	-8495.3
12	1.2		-27834	-8495.3
13	1.3		-27835	-8495.6
14	1.4		-27833	-8495
15	1.5		-27837	-8495.2
16	1.6		-27834	-8495.3
17	1.7		-27835	-8495.6
18	1.8		-27834	-8495.3
19	1.9		-27835	-8495.6
20	2		-27835	-8495.6

Figura 4.18 Ejemplo de salida de datos recogidos por el extensómetro.

El PC conectado a la Máquina Instron de Ensayos Universal, recoge la evolución de la carga aplicada sobre la probeta en el tiempo, junto con el desplazamiento del percutor, como se muestra en la Figura 4.19.

Hora Seg.	Posición mm	Cargar kN	Ciclo
0	678.693	0.0067091	1
0.1	678.651	0.00816584	1
0.2	678.621	0.00794411	1
0.3	678.597	0.00665843	1
0.4	678.561	0.00624478	1
0.5	678.519	0.00704408	1
0.6	678.485	0.00952363	1
0.7	678.456	0.00725865	1
0.8	678.436	0.0104111	1
0.9	678.392	0.00811458	1
1.1	678.366	0.0110251	2
1.1	678.331	0.00737667	2
1.2	678.287	0.00837028	2
1.3	678.263	0.00888765	2
1.4	67.822	0.00733733	2
1.5	678.193	0.00822425	2
1.6	678.161	0.00879288	2
1.7	678.136	0.00839472	2
1.8	678.088	0.00653267	2
1.9	678.062	0.00533938	2
2	678.028	0.0080663	3
2.1	678.001	0.00674129	3
2.2	677.958	0.0096292	3
2.3	677.925	0.00512183	3
2.4	677.889	0.009197	3
2.5	677.858	0.00847638	3

Figura 4.19 Ejemplo de salida de datos recogidos por la Máquina de Ensayos Universal.

4.4.2 Tratamiento de datos

Los datos recogidos de la Máquina de Ensayos Universal de ensayos estáticos se procesan de la siguiente forma:

Del ordenador conectado al extensómetro se obtienen archivos .xls (Figura 4.18) donde se recogen la variación de tensión en cada instante de tiempo. Previamente se mide la máxima deformación del percutor, anotándose la distancia en milímetros y la variación de tensión en milivoltios, que servirá como factor de conversión para pasar de tensión a desplazamiento.

Con estos datos, se representa en una gráfica el desplazamiento frente al tiempo para obtener el desplazamiento máximo en cada tipo de ensayo, según se muestra en la Figura 4.20. Se añaden todos los resultados juntos en las tablas de los Anexos.

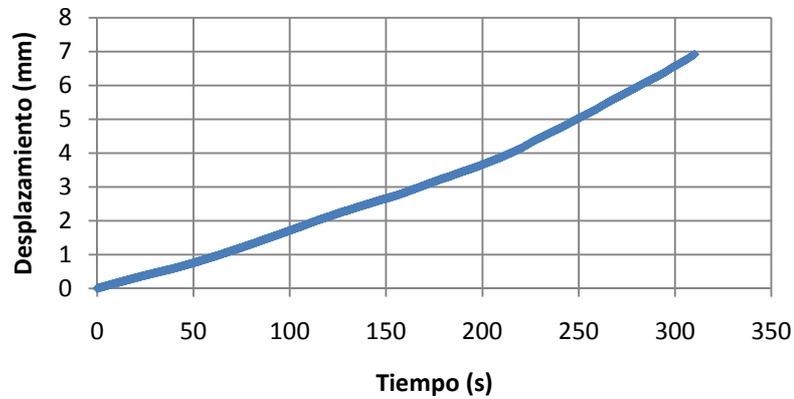


Figura 4.20 Curva de desplazamiento frente a tiempo con el extensómetro para la obtención del desplazamiento máximo.

En los ensayos posteriores también es posible usar la función de Excel MÁXIMO(), para obtener los valores máximos de desplazamiento.

En este momento del estudio se añadieron las tres probetas de control, no ensayadas anteriormente. De esta forma se compara la fuerza soportada en los ensayos estáticos de las barras ensayadas previamente, con la soportada por las barras de control, así como el desplazamiento sufrido por unas y otras barras. Los resultados se recogen en las tablas de los Anexos.

Con el ordenador conectado a la Máquina se guardan archivos .xls (Figura 4.19) con la variación de la posición del percutor en milímetros, la fuerza aplicada en kN, y el instante de tiempo en segundos, que servirán para compararse con los datos recogidos por el extensómetro.

De la misma forma que con los datos recogidos con el extensómetro, con los de la máquina, se hallan con la función MÁXIMO(), los valores máximos de desplazamiento y fuerza obtenidos en cada ensayo, incluidos los ensayos con las probetas de control. Estos datos se recogen en las tablas de los Anexos.

Para el cálculo del porcentaje de fuerza resistida por el elemento tubular, que se representará posteriormente en el apartado de resultados, se divide la fuerza máxima media de cada ensayo por la fuerza máxima media obtenida en las probetas de control, como se indica en la Ecuación 4.6:

$$\% F_{resistida} = \frac{F_{BAI_máxima_media}(N)}{F_{control_máxima}(N)} \cdot 100$$

Ecuación 4.6

Capítulo 5

Resultados

Con todos los valores obtenidos de los distintos ensayos según se cita anteriormente, se procesan y grafican diferentes variables para realizar el análisis del comportamiento frente a impacto de los elementos tubulares de fibra de carbono.

Para los ensayos de impacto (dinámicos) se representará la energía absorbida, calculada a partir de los datos proporcionados por la Cámara de Alta Velocidad (método 1) y mediante la realización de integrales sucesivas (método 2), en función de la energía de impacto del ensayo. También se representan la carga resistida por los tubos, el desplazamiento de los puntos superior e inferior en las probetas y el tiempo de contacto, en función de la energía de impacto del ensayo.

En cuanto a los ensayos de resistencia residual (estáticos), primeramente se graficarán, para las muestras de control, la fuerza frente al desplazamiento medida por la Máquina y la fuerza frente al desplazamiento medido por el extensómetro. A continuación se hará lo mismo para el resto de ensayos (15,20,25 y 30 Julios), y así se podrá comparar ambos resultados de desplazamiento obtenidos en unos y otros ensayos y extraer la fuerza máxima soportada por las fibras.

También se graficará el porcentaje de fuerza soportado por cada tipo de ensayo (tubos sometidos a 15, 20, 25 y 30 J), calculados mediante la Ecuación 4.6, y gracias a los datos recogidos de los ensayos realizados con las probetas de control, frente a la energía de impacto, calculada según la ecuación de la energía cinética (Ecuación 4.1).

Por último se representará el desplazamiento máximo, recogido por la Máquina y por el sensor LVDT, para las muestras ya ensayadas previamente con 15, 20 25 y 30 Julios de energía.

Se recuerda, que la energía de impacto, representada en el eje de abscisas en la mayoría de las gráficas, es hallada con los datos referidos a la Cámara de Alta Velocidad. Para el cálculo de esta energía, se utilizan las variables v_{impacto} , que es la velocidad de impacto del percutor medida por la Cámara, y m , que es la masa en kg del percutor. Los valores se incluyen en las tablas de los Anexos.

5.1 Ensayos de impacto

Para comparar los dos métodos de cálculo de la energía absorbida, se representa en la Figura 5.1, en el eje vertical, la energía absorbida por el material durante el impacto, obtenida por los dos métodos (incluidos en los Anexos). El método 1, utilizando los valores de velocidad obtenidos de la cámara, y empleando la Ecuación 4.2; y el método 2, usando los datos de los ficheros extraídos de la Torre e integrando. En el eje horizontal se representa la energía de impacto de la cámara (media).

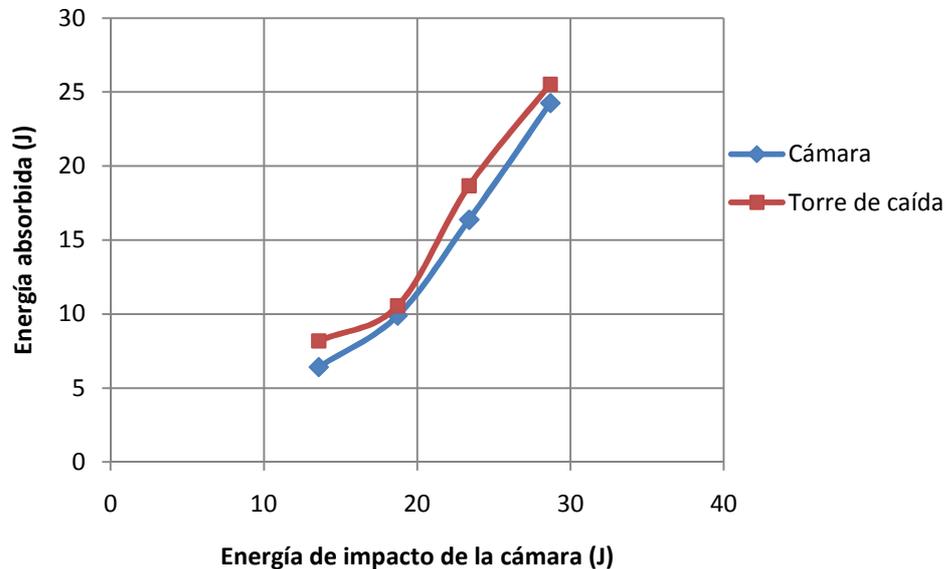


Figura 5.1 Representación de la energía absorbida, hallada con la cámara y con los ficheros de la torre, en función de la energía de impacto de la cámara.

Para observar mejor la absorción de energía por el material de los tubos, se representa a continuación, el porcentaje de energía absorbida por cada método sobre la total de impacto de la cámara, en función de la energía de impacto, en la Figura 5.2.

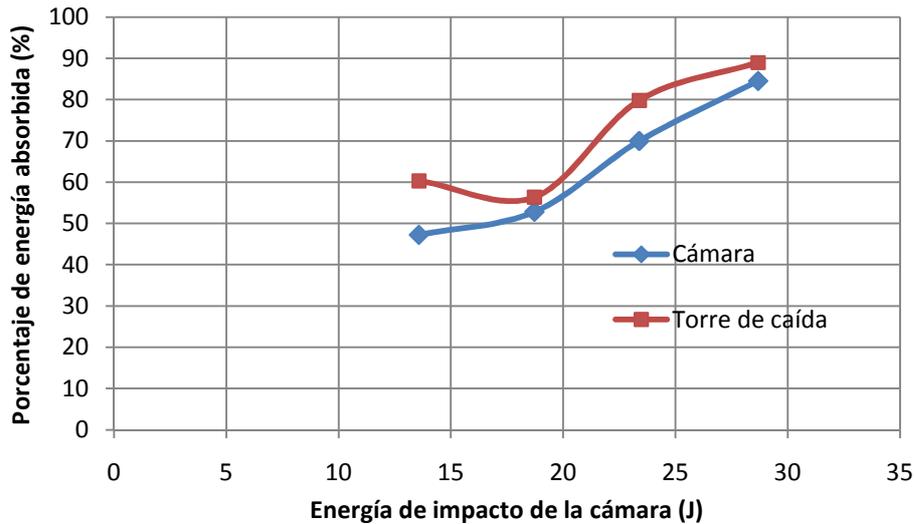


Figura 5.2 Representación del porcentaje de energía absorbida en función de la energía de impacto de la cámara.

Como se observa de la Figuras 5.1 y 5.2, referidas a la absorción de energía dinámica calculada por dos métodos distintos, en función de la energía de impacto, cuanto más grande es la energía del impacto, mayor energía es absorbida por el material. Esto concuerda con lo explicado en los antecedentes, respecto a alta capacidad de absorción de energía dinámica de los materiales compuestos.

La pequeña diferencia entre energías absorbidas halladas por ambos métodos (unos 3 Julios) que se observa en la Figura 5.1, puede deberse a pérdidas por rozamiento o pérdidas de velocidad que afectan a la energía que sólo son apreciables con las medidas de la cámara.

A pesar de ello, y exceptuando el valor obtenido con la Torre de Caída para el ensayo de 15 Julios, que debido a las vibraciones del ensayo, presenta un valor más alejado al resto, se cumple la tendencia creciente en las dos curvas.

A continuación se representa en la gráfica de la Figura 5.3, la carga máxima soportada por la probeta en cada ensayo, según su energía de impacto.

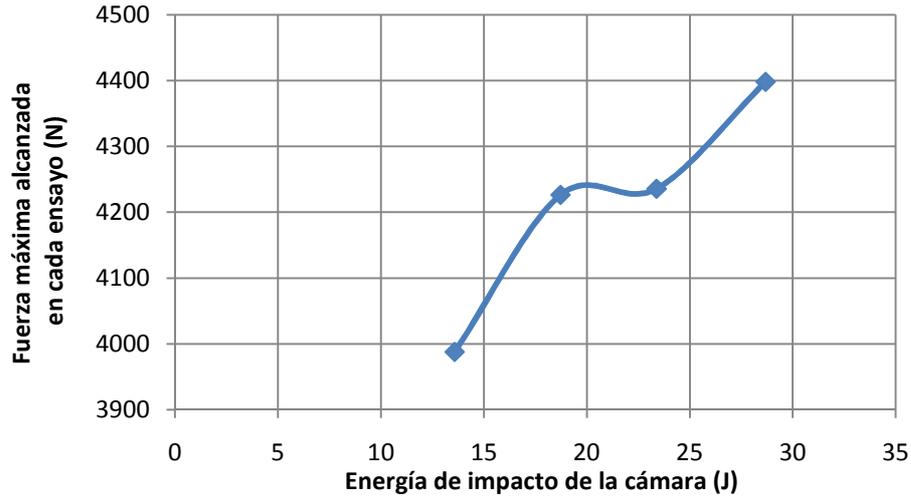


Figura 5.3 Representación de los puntos de fuerza máxima obtenidos en cada ensayo, en función de la energía de impacto de la cámara.

La fuerza máxima obtenida en cada ensayo, aumenta con la energía de impacto del ensayo, como se observa en la Figura 5.3. Sin embargo, esta relación no obtiene toda la linealidad que debería, si se observa la forma de esta curva. Es debido a las interferencias de la máquina producidas por vibraciones a la frecuencia natural de la misma, que distorsionan la señal recogida, por tanto no se deben de tomar los valores de fuerza instantánea obtenidos de la Torre de Caída como absolutamente ciertos.

Los desplazamientos de los puntos superior e inferior en los tubos (ver Figura 4.6), calculados a partir de los datos recogidos de la Cámara de Alta Velocidad, y de los datos de la Torre de Caída, en cada tipo de ensayo según su energía de impacto, se pueden observar en la Figura 5.4:

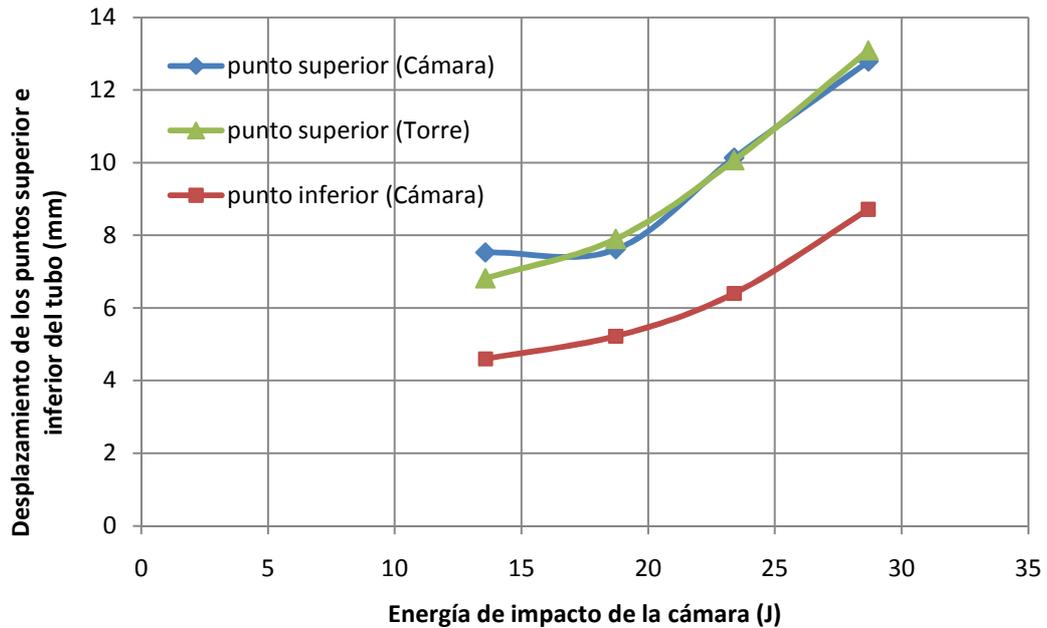


Figura 5.4 Representación del desplazamiento de los puntos superior (contacto) e inferior, en función de la energía de impacto del ensayo.

La Figura 5.4 representa los desplazamientos de los puntos de contacto superior e inferior de los tubos y confirma de nuevo la tendencia creciente en función de la energía de impacto. Es decir, a medida que aumenta la energía de impacto del ensayo, el desplazamiento incurrido en los puntos superior e inferior de la probeta es mayor. Como indica la propia gráfica, el punto que mayor desplazamiento sufre es aquel donde actúa la carga o punto superior, mientras que el punto opuesto (punto inferior) de la barra se desplaza entre dos y cuatro milímetros menos.

Se puede observar la gran coincidencia entre los datos recogidos de desplazamiento del punto superior de la probeta por la Torre de Caída y los hallados a partir de los datos de la Cámara de Alta Velocidad (curvas en color verde y azul en la Figura 5.4).

Por último se representa en la Figura 5.5, con los datos de la Cámara de Alta Velocidad, el tiempo de impacto, desde que entra en contacto el percutor con el tubo, hasta que se separa, para cada ensayo, en función de la energía de impacto de la cámara. Los datos para la elaboración de esta gráfica se incluyen en las tablas de los Anexos.

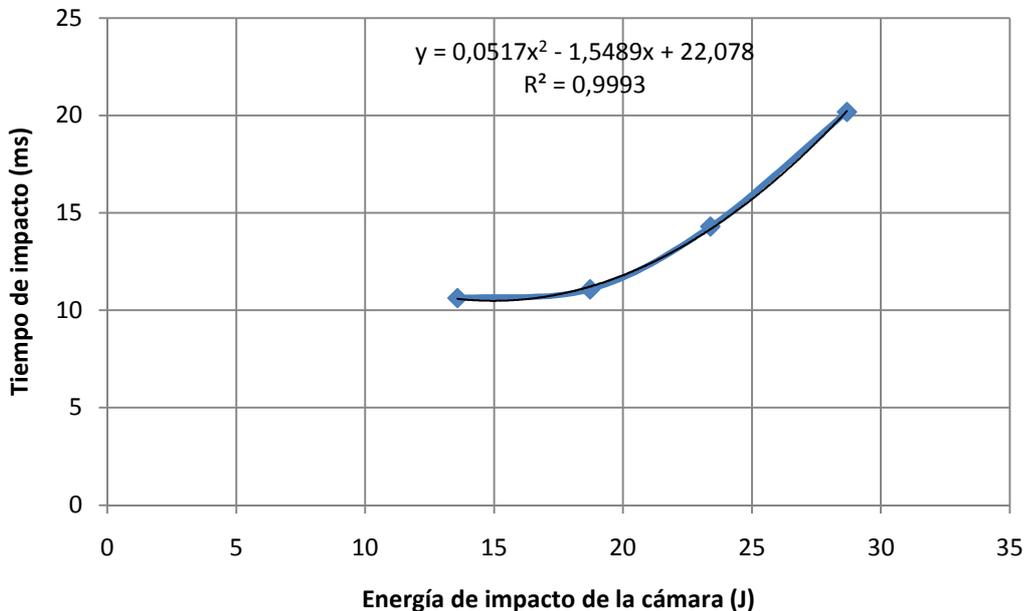


Figura 5.5 Representación del tiempo de impacto medio en cada ensayo según la energía de impacto.

Para finalizar, en lo que se refiere a la discusión de los ensayos dinámicos en la Torre de Caída, el tiempo de impacto también crece con la energía de impacto del ensayo. Las dos variables siguen una relación de tipo polinómica de grado dos, como muestra la curva de tendencia en la Figura 5.5. Es decir, que a mayor energía de impacto, el tiempo en el que el percutor está haciendo contacto con la probeta, es mayor. Esto es coherente con el hecho de que se esté absorbiendo más energía con mayor energía de impacto.

5.2 Ensayos de resistencia residual

Como se dijo anteriormente, para los resultados de los ensayos estáticos, en primer lugar se representan las curvas fuerza-desplazamiento, referidas a los ensayos con las probetas de control, para su posterior comparación con los tubos impactados en el ensayo dinámico.

La variación de fuerza frente al desplazamiento recogido por la Máquina y el extensómetro LVDT (línea más gruesa), se muestra en la siguiente Figura 5.6, tomándose los valores del ensayo R_control2, que es el que más se ajusta a los valores medios, según se indica en las tablas de los Anexos.

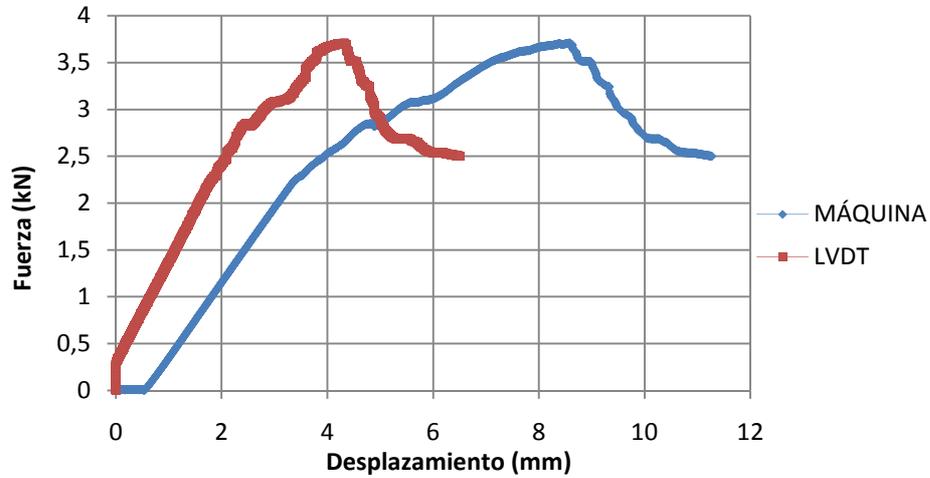


Figura 5.6 Representación de la fuerza aplicada en función del desplazamiento, recogido por la Máquina y por el extensómetro en el ensayo con la probeta de control.

En las siguientes Figuras 5.7, 5.8 ,5.9 y 5.10 se representa la variación de fuerza con el desplazamiento, medido con la Máquina de Ensayos Universal y con el extensómetro, para los tubos ensayados previamente con 15, 20, 25 y 30 Julios de energía de impacto.

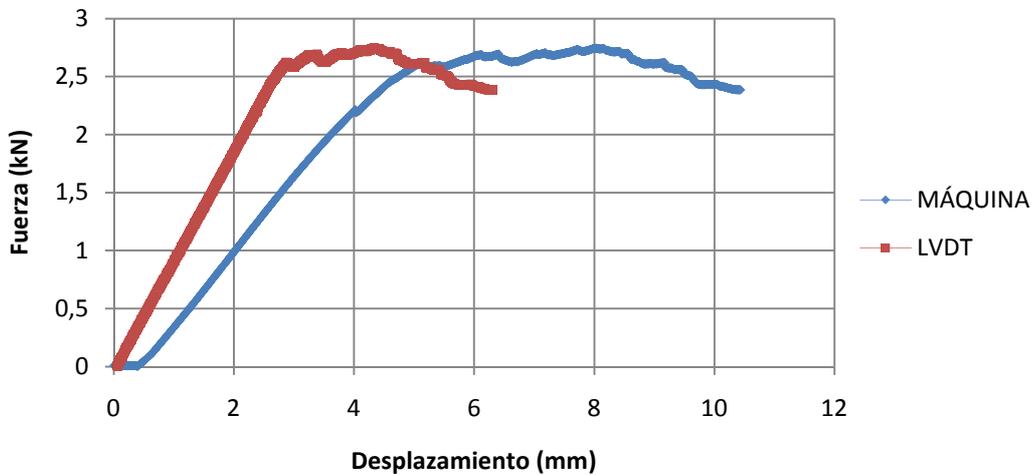


Figura 5.7 Representación de la fuerza del ensayo en función del desplazamiento, medido por la Máquina y por el sensor LVDT, para el ensayo de 15 Julios.

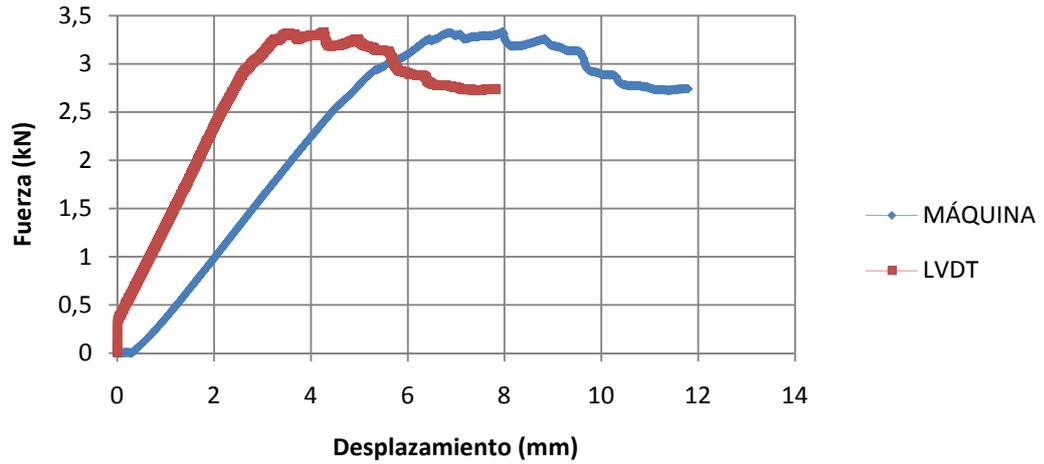


Figura 5.8 Representación de la fuerza del ensayo en función del desplazamiento, medido por la Máquina y por el sensor LVDT, para el ensayo de 20 Julios.

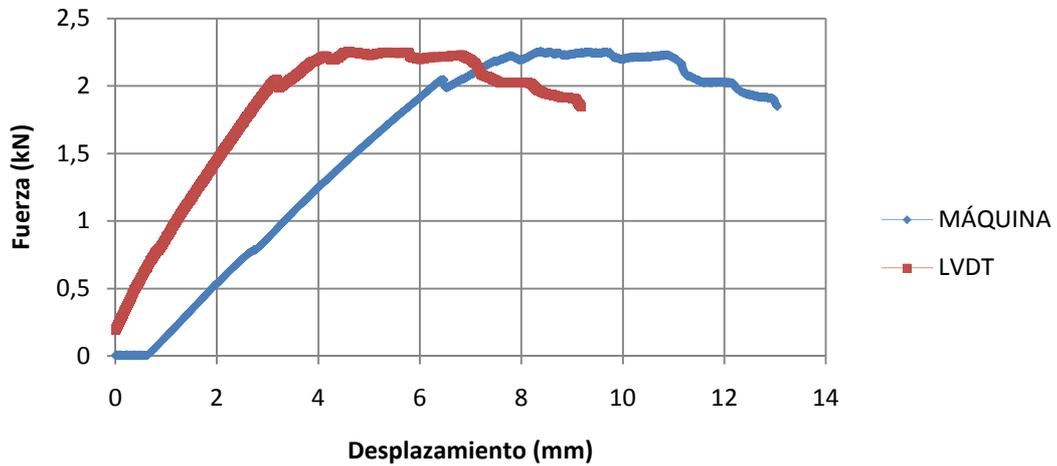


Figura 5.9 Representación de la fuerza del ensayo en función del desplazamiento, medido por la Máquina y por el sensor LVDT, para el ensayo de 25 Julios.

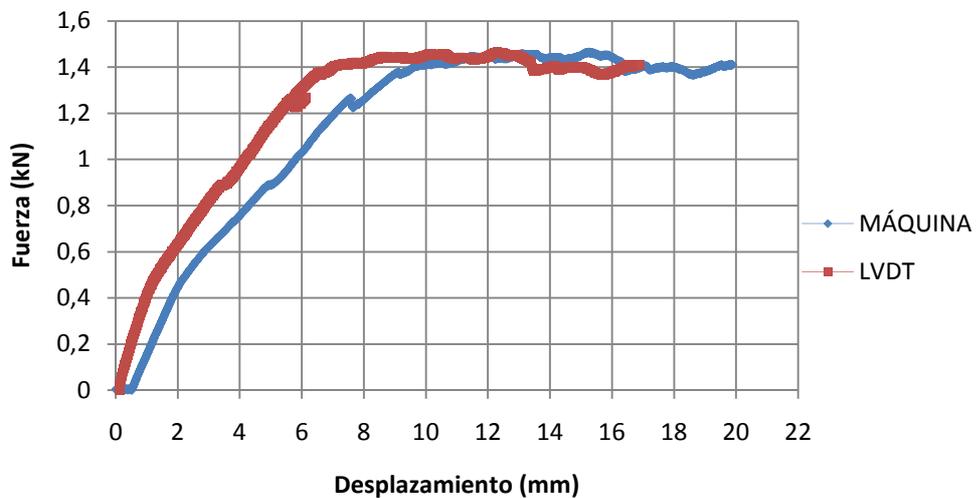


Figura 5.10 Representación de la fuerza del ensayo en función del desplazamiento, medido por la Máquina y por el sensor LVDT, para el ensayo de 30 Julios.

De estas curvas fuerza-desplazamiento obtenidas cabe mencionar, en primer lugar, la diferencia que se observa en los datos de desplazamiento, entre los recogidos por la Máquina y por el extensómetro LVDT. Como se observa en las Figuras 5.6, 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, y 5.13, los datos de desplazamiento medidos con uno y otro dispositivo no coinciden, a pesar de que se obtienen unas curvas muy parecidas, pero desplazadas unos cuantos milímetros. Esto es debido a que el sensor de la Máquina, que recoge más milímetros de desplazamiento que el sensor LVDT, mide el desplazamiento efectuado en la probeta más el propio interno de la Máquina, mientras que el extensómetro LVDT solo recoge el desplazamiento de la probeta. También es debido, a que el sensor de la Máquina recoge el desplazamiento del punto superior y el sensor del extensómetro mide el desplazamiento del punto inferior (ver Figura 4.6), y como ya se vio en los ensayos dinámicos a partir del programa de la cámara, el punto superior de contacto percutor-probeta se desplaza más que el punto inferior.

A pesar de esta discrepancia se consideran como buenos los resultados obtenidos debido a la similitud de las curvas. Todas las curvas fuerza-desplazamiento mantienen la misma tendencia de aumentar de forma lineal, hasta un punto, luego siguen aumentando hasta el valor máximo, dado por la carga máxima soportada, y de ahí comienza a decrecer la fuerza soportada, pero sigue aumentando el desplazamiento incurrido en las probetas.

Por otro lado, centrándose en los ejes de abscisas de las Figuras 5.6, 5.7, 5.8, 5.9 y 5.10, se cumple que, tanto para los ensayos con las probetas de control como para el resto de los ensayos (R15,R20,R25 y R30), las probetas que han sido impactadas en la Torre con mayor energía de impacto, posteriormente en el ensayo estático registran mayor desplazamiento (tanto medido con la Máquina, como con el extensómetro). Es decir, a mayor energía de impacto en el ensayo dinámico, mayor desplazamiento producido luego en el estático. El ensayo estático realizado en la probeta de control registró un desplazamiento máximo aproximado de 6 milímetros (medido con el extensómetro) mientras que el ensayo R30, impactado dinámicamente con una energía de impacto cercana a 30 Julios, grabó un desplazamiento de 17 milímetros. Esto refleja el efecto recuerdo característico de los materiales compuestos.

A continuación se recoge en la gráfica de la Figura 5.11, la carga máxima soportada por la probeta en cada ensayo, según la energía de impacto del ensayo previo.

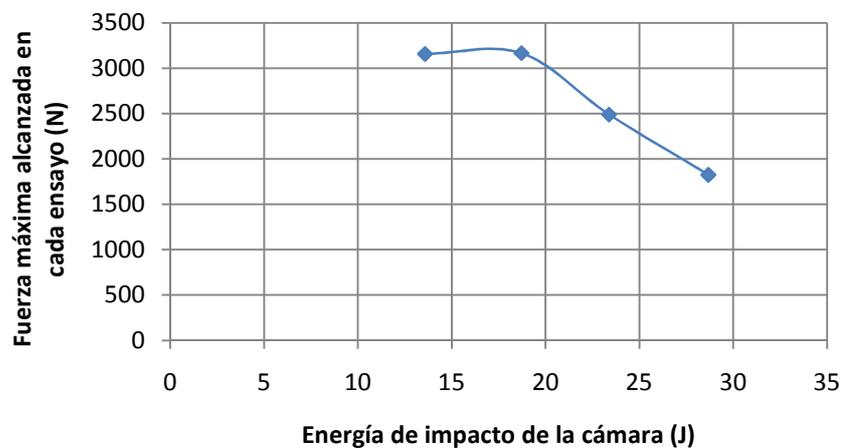


Figura 5.11 Representación de los puntos de fuerza máxima obtenidos en cada ensayo, en función de la energía de impacto.

Analizando ahora la carga máxima soportada por ensayo, se comprueba el comportamiento opuesto de los ensayos BAI estáticos, frente a los dinámicos. En los ensayos dinámicos, la fuerza máxima recogida aumentaba en función de la energía de impacto, mientras que ahora, al usar las probetas cargadas anteriormente, las que mayor energía de impacto recibieron, ahora soportan menor carga (a excepción de la muestra R20), según la Figura 5.11. Gracias a la representación de la fuerza en función del desplazamiento de la Figura 5.6, se puede confirmar que las probetas de control, no cargadas previamente, son las que más carga resisten (unos 3.7 kN), y los posteriores ensayos con energías de 15,20,25 y 30 Julios demuestran que, a mayor energía, menor carga soportada, excepto para el caso de 20 Julios, que registra una fuerza máxima mayor que en el de 15 Julios. Esto puede deberse al poco daño sufrido por las barras en los ensayos dinámicos al tratarse de tan bajas energías.

A continuación se muestra en la Figura 5.12, el porcentaje de fuerza resistida de cada ensayo sobre la fuerza resistida por las probetas de control, mediante la Ecuación 4.6, en función de cada energía de impacto:

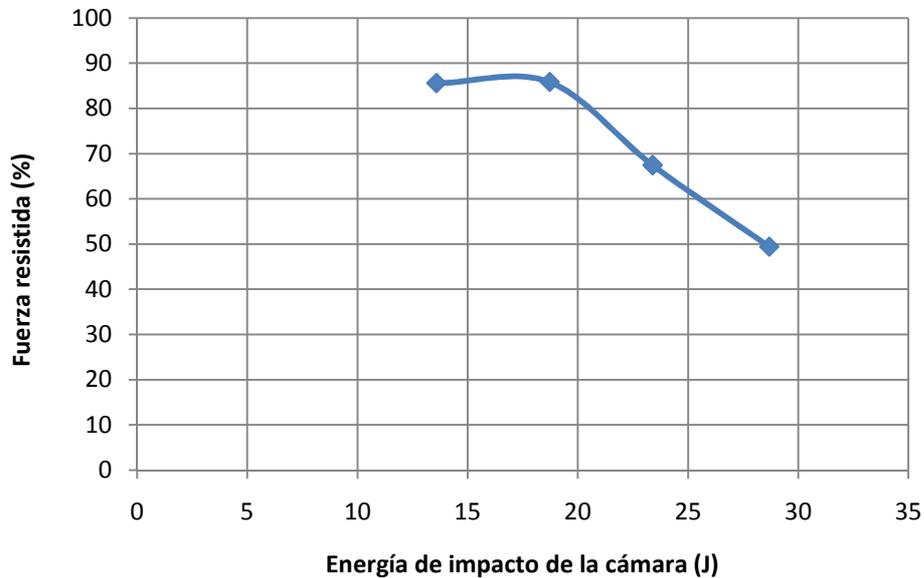


Figura 5.12 Capacidad de absorción de carga en función de la energía de impacto de la cámara.

En esta gráfica (Figura 5.12) se puede ver la evolución de la capacidad de resistir la carga máxima de las barras en los ensayos estáticos, en función de la energía del impacto previo. Como se observó en la anterior Figura 5.11, la tendencia es a reducir el porcentaje de fuerza resistida sobre la probeta de control para mayores energías del impacto del ensayo dinámico, teniendo como excepción al ensayo de 20 Julios. Para los ensayos BAI, las barras que soportan mayor fuerza son las de los ensayos con menor energía de impacto.

Finalmente se presenta el desplazamiento máximo medido con la Máquina de Ensayos y con extensómetro LVDT, frente a la energía de impacto en los cuatro tipos de ensayo (ensayos de 15,20,25 y 30 Julios) en la Figura 5.13.

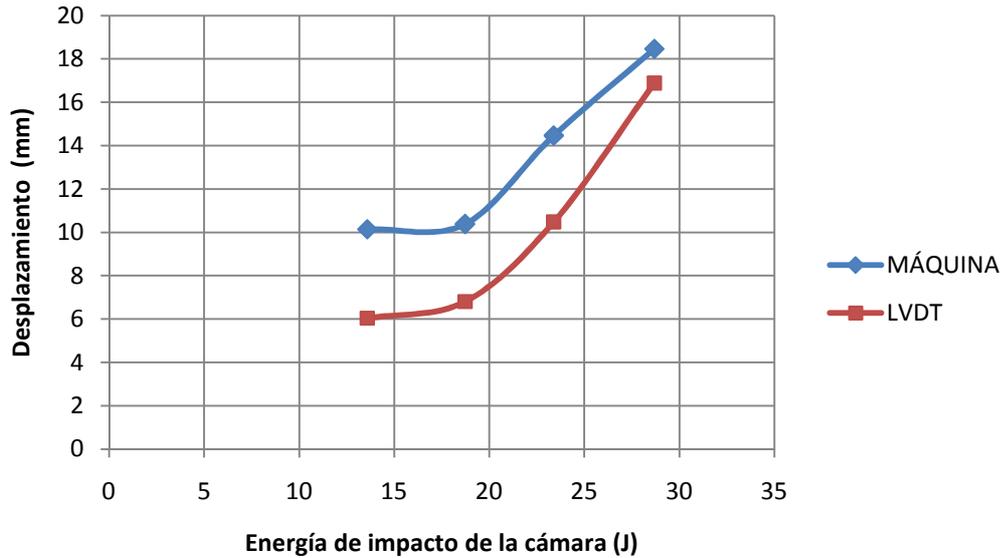


Figura 5.13 Desplazamiento máximo medido con la Máquina de ensayos estáticos y con el extensómetro LVDT en función de la energía de impacto de la cámara.

En la Figura 5.13 se observa, de nuevo, la diferencia que existe entre los desplazamientos medidos por la Máquina y por el extensómetro, ya que, como se explicó anteriormente, el sensor de la Máquina recoge el desplazamiento del punto superior del tubo (desplazamiento del percutor de impacto), mientras que el sensor LVDT, situado por debajo del tubo, recoge el desplazamiento del punto inferior del tubo. Y como se demostró en los ensayos dinámicos el punto de contacto del tubo con el percutor se desplaza más que el punto inferior.

Como ya se había venido observando, a mayor energía de impacto en el ensayo en la Torre de Caída, mayor desplazamiento producido, posteriormente, en la probeta, en el ensayo estático en la Máquina de Ensayos Universal.

Capítulo 6

Conclusiones

En este capítulo se incluyen las conclusiones de los resultados obtenidos en todo conjunto del Proyecto de Final de Carrera. Primero se exponen las conclusiones a las que se han llegado a partir de los ensayos de impacto. A continuación se detallan las recogidas en los ensayos de resistencia residual.

Por último se hará un recorrido por todo el proyecto, indicando cómo se consiguieron los objetivos establecidos, la experiencia adquirida del mismo y la conclusión final a la que se llega con el presente estudio sobre el comportamiento mecánico de elementos tubulares de sección circular. También se añaden unos posibles trabajos futuros que se pudieran desarrollar en la misma línea de investigación del presente proyecto

6.1 Ensayos de impacto

- La primera conclusión que se saca de los ensayos dinámicos, es que, a mayor energía de impacto, la fuerza máxima instantánea que soporta la probeta es mayor.
- Al representar las curvas fuerza-tiempo, se observa el ruido que presenta la curva, debido a las vibraciones ocasionadas por la Torre de Caída.
- El área dañada en las probetas de material compuesto de fibra de carbono, después de los ensayos en la Torre de Caída, se puede evaluar con cierta facilidad mediante inspección visual, sin embargo es difícil diferenciar la extensión del daño en función de la energía de impacto ensayada.

- Los resultados de la velocidad máxima de impacto en cada ensayo, obtenidos de los ficheros recogidos por la Torre de Caída concuerdan con los hallados con el software de la cámara. La diferencia entre las velocidades de impacto halladas con la cámara y las obtenidas de la Torre de Caída, es de centésimas de m/s (errores próximos al 1%).
- En lo referente al desplazamiento de la probeta en función de la energía de impacto, se consideran muy válidos los resultados obtenidos ya que para el punto superior, se obtienen resultados muy parecidos de los datos sacados de la cámara de filmación, a los datos sacados de los ficheros exportados de la Torre de Caída.

6.2 Ensayos de resistencia residual

- La primera conclusión que se ha sacado de los ensayos en la Máquina de Ensayos Universal, es que, los desplazamientos de los puntos superior e inferior de las probetas difieren ligeramente, como demuestran las mediciones de la Máquina de Ensayos Universal, y del extensómetro LVDT.
- En los ensayos de resistencia residual, a mayores energías de impacto, el material soporta menor carga máxima antes del fallo, lo que indica que las condiciones de este ensayo son más desfavorables para el laminado de material compuesto.
- A mayor energía de impacto en el ensayo en la Torre de Caída, mayor desplazamiento producido, posteriormente en la probeta, en el ensayo de impacto residual en la Máquina de Ensayos Universal.
- Al igual que ocurría en los ensayos dinámicos, el área dañada en las probetas de material compuesto de fibra de carbono, después de los ensayos en la Máquina de Ensayos Universal, se puede observar a simple vista en el punto de contacto de la probeta con el percutor, sin embargo es difícil diferenciar el nivel de daño en función de la energía de impacto ensayada.

6.3 Consideraciones finales

Este estudio sobre comportamiento mecánico de elementos tubulares de sección circular fabricados con fibra de carbono, ha servido para comprobar las propiedades que tienen éstos en determinadas condiciones de impacto, que era el objetivo principal del mismo. Como se ha explicado en las conclusiones referidas a los ensayos dinámicos, la primera deducción final que se ha sacado, es que los elementos tubulares de sección circular de material compuesto tienen muy buena capacidad de absorber la energía de los impactos dinámicos, es decir, aquellos que ocurren con altas velocidades de deformación, comparados con los metales.

Además de esto, otra ventaja con respecto a otros elementos estructurales de materiales metálicos, reside en su baja densidad. Gracias a ello, se mejoraría la eficiencia del consumo de combustible y se reducirían las emisiones de CO₂, por lo tanto, el emplear materiales compuestos, en vez de metales, ayudaría a ser más respetuoso con el medio

ambiente. Las barras de fibra de carbono, con un peso de 174.5 gramos, suponen un ahorro de peso del 48%, en comparación con unas de idénticas dimensiones fabricadas en acero, con un peso aproximado de 362 gramos.

También es importante para su aplicación como medios de seguridad pasiva de los automóviles, el hecho de que absorban gran cantidad de energía de impacto, sin sufrir grandes deformaciones, debido a la alta rigidez de algunos materiales compuestos, como los de fibra de carbono. Es también significativa la capacidad de recuperación de sus deformaciones, ya que al retirar la carga, la probeta volvía a su estado inicial. Es decir, tienen comportamiento elástico.

Hay que tener en cuenta el efecto recuerdo de los materiales compuestos, ante ensayos estáticos después de impacto, ya que a simple vista, las barras precargadas tenían los mismos daños aparentes en su exterior, mientras que internamente, el laminado se encontraba en peor condición, lo que provocó los resultados de baja fuerza resistida para las barras con más precarga.

De los ensayos BAI, se deduce que, los elementos tubulares de material compuesto, no poseen una ventaja competitiva frente a otros materiales metálicos como el acero, en cuanto a su comportamiento frente a impacto ante cargas estáticas, con mayor duración del ensayo. Esto es debido a la deslaminación que se produce en el material compuesto, que al alargar el tiempo del ensayo va reduciendo drásticamente su rigidez y resistencia, al ir perdiendo fibras progresivamente.

Finalmente, es de señalar que este estudio sobre comportamiento frente a impacto de elementos tubulares de sección circular, ha cumplido con todos los subobjetivos planteados al comienzo del mismo:

- ✓ Se ha demostrado una relación lineal entre las variables de energía absorbida, fuerza máxima, desplazamiento y tiempo de impacto de los ensayos en la Torre de Caída, y las energías de impacto utilizadas (15,20,25 y 30 Julios).
- ✓ Se adaptaron los útiles existentes y se idearon, diseñaron y fabricaron otros dispositivos para la realización correcta de los dos tipos de ensayos.
- ✓ Se ha verificado que la resistencia residual de los elementos tubulares ensayados de material compuesto, disminuye con la energía de impacto del ensayo previo.
- ✓ Se ha probado, para los dos tipos de ensayos realizados, que los puntos superior e inferior de los elementos tubulares sufren distinto desplazamiento, siendo algo mayor, el del punto superior de contacto probeta-percutor.
- ✓ Se ha calculado la energía absorbida por las probetas mediante tres métodos distintos, observando que, la pequeña diferencia existente entre los dos métodos de cálculo con los datos de la Torre de Caída y el método con los datos de la Cámara de Alta Velocidad, se debe a la mayor precisión de ésta última a la hora de recoger los datos de tiempo y desplazamiento.

6.4 Trabajos futuros

Los materiales compuestos están llamados a ser el sustituto natural de los metales en muchas aplicaciones industriales por sus ventajas ya indicadas de alta resistencia mecánica y bajo peso específico. Hoy en día la mayoría de las empresas que fabrican

componentes para el sector de los transportes los utilizan o investigan en su uso. Es por ello que, cualquier estudio como el presente Proyecyo, en el que se sometan a ensayos, se analicen y comparen materiales compuestos, tendrá una muy buena aceptación.

Este proyecto de Fin de Carrera sobre el comportamiento mecánico de elementos tubulares de sección circular de fibra de carbono, junto con los estudios ya existentes dentro del mismo área estudiados en el Capítulo de Antecedentes, dejan la puerta abierta a numerosos estudios adicionales.

Empezando por el material empleado, la fibra de carbono es el material compuesto por excelencia en la actualidad, por sus muy buenas propiedades mecánicas, sin embargo debido a su elevado coste de fabricación, hace difícil su utilización en la industria del automóvil. Por ello, este mismo estudio se puede aplicar a otros compuestos como fibra de vidrio en matriz epoxi, fibra de vidrio en viniléster, fibra de aramida en matriz termoplástica, etc, que también gozan de buenas propiedades y se producen de forma más barata.

Otros estudios futuros pueden ir encaminados al análisis de los elementos tubulares de sección circular de fibra de carbono, comparando los resultados de los ensayos mecánicos con métodos de análisis computacional, como los elementos finitos. Sin embargo, hoy en día existen pocos programas que permitan análisis completos de materiales compuestos, por la dificultad que plantea el no ser materiales isótropos, teniendo que utilizar subrutinas llevadas a cabo por usuarios con altos conocimientos en programación.

También, se pueden llevar a cabo estudios futuros sobre otros componentes estructurales de otros vehículos, como motocicletas, bicicletas, barcos etc, como se está desarrollando en la industria aeronáutica. Se pueden estudiar gran variedad de secciones y formas estructurales y su comportamiento ante los ensayos, ya que, por ejemplo, con barras cuadradas se obtendrían mejores resultados que con las barras de sección circular, debido a la mayor superficie de contacto de las barras cuadradas.

Para finalizar, sería de especial interés, realizar un estudio complementario al presente, que evalúe la influencia de los tornillos en las placas de fijación de los útiles de los ensayos, y verifique si alteran los resultados obtenidos.

Capítulo 7

Referencias

- [1] Enciclopedia online Wikipedia. http://es.wikipedia.org/wiki/Material_compuesto.
- [2] Enciclopedia online Wikipedia. http://es.wikipedia.org/wiki/Fibra_de_carbono.
- [3] <http://uruapan.olx.com.mx/tela-de-fibra-de-carbono-iid-21399908>, Uruapan, Michoacan, México.
- [4] www.utp.edu.co/~publio17/temas.../prop_mecanicas_1.pdf.
- [5] H. Lobo and J. Lorenzo, “High Speed Stress-Strain Material Properties As Inputs For The Simulation Of Impact Situations”. IBEC Proceedings, 1997.
<http://www.testpaks.com/3POINTBENDING.htm>.
- [6] Seong Sik Cheon, Dai Gil Lee & Kwang Seop Jeong: “Composite side-door impact beams for passenger cars”, Composite Structures Vol. 38. Páginas 229-239, 1997.
- [7] S. Erzen, Z. Ren e I. Anzel: “Analysis of FRP side-door impact beam”, Professional Engineering Publishing Limited, Faculty of Mechanical Engineering, Maribor, Slovenia, 2002.
- [8] Ren, Z. Glodez, S., “Machine elements”- vol.1, University of Maribor, 2001.
- [9] David W. Palmer, Lawrence C. Bank y T. Russell Gentry: “Progressive Tearing Failure of pultruded composite box beams: experiment and simulation”, Composites Science and Technology 58. Páginas 1353-1359, 1998.
- [10] LS-DYNA3D, Livermore Software Technology Corporation, 2876 Waverley Way Livermore, CA 94550, USA.

- [11] Carlos Santiuste Romero. “Análisis y modelización de vigas de tipo laminado sometidas a cargas impulsivas”. Tesis Doctoral. Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras, 2007.
- [12] Inés Ivañez, Carlos Santiuste, Sonia Sanchez-Sáez. “Análisis experimental del comportamiento a flexión dinámica de vigas sándwich”. Proceeding of: V International Conference on Science and Technology of Composite Materials, 8º Congreso Nacional de Materiales Compuestos COMATCOMP, páginas 1081-1084, 2009.
- [13] S. K.García Castillo, S. Sánchez-Sáez, E. Barbero Pozuelo, C. Navarro. “Comportamiento frente a impacto de placas de fibra de vidrio/viniléster”. Materiales compuestos 05 : actas del VI Congreso Nacional de Materiales Compuestos, Valencia, 2005.
- [14] Inés Ivañez, Carlos Santiuste, Sonia Sanchez-Sáez. “FEM analysis of dynamic flexural behavior of composite sandwich beams with foam core”. Composite Structures, v. 92, nº 9, pp. 2285-2291 (Fifteenth International Conference on Composite Structures), 2010.
- [15] Tae Seong Lim, Dai Gil Lee. “Mechanically fastened composite side-door impact beams for passenger cars designed for shear-out failure modes”, Composite Structures 56. Páginas 211-221, 2002.
- [16] Saiphon Charoenphan, Lawrence. Bank, Michael E. Plesha, “Progressive tearing failure in pultruded composite material tubes”, Composite Structures 63, 45-52, 2004.
- [17] Derek Hull y T.W. Clyne. “An introduction to composite materials”. Cambridge University Press, 1996.
- [18] Derek Hull. “Materiales compuestos”. Reverté. 1987.

Anexos

ENSAYO	MEDIDA _{REGLA 2} cm	DISTANCIA _{bajada} (pix.)	DISTANCIA _{bajada} (m)	TIEMPO _{bajada} (s)	V _{bajada} (m/s)
R_15_1	75	99	0,0264	0,012551	2,10342
R_15_2	76	97	0,0255	0,012111	2,10770
R_15_3	75	100	0,0267	0,012666	2,10537
R_20_1	76	100	0,0263	0,010667	2,46703
R_20_2	75	99	0,0264	0,010667	2,47492
R_20_3	75	100	0,0267	0,010778	2,47418
R_25_1	75	101	0,0269	0,009778	2,75448
R_25_3	75	99	0,0264	0,009555	2,76295
R_25_4	75	97	0,0259	0,009333	2,77153
R_30_1	75	102	0,0272	0,008889	3,05996
R_30_2	75	102	0,0272	0,008889	3,05996
R_30_3	75	101	0,0269	0,008778	3,06828
R_30_4	75	98	0,0261	0,008556	3,05439
R_30_5	74	98	0,0265	0,008667	3,05602

Datos para la obtención de velocidades de impacto de la cámara.

ENSAYO	DISTANCIA _{subida} (pix.)	DISTANCIA _{subida} (m)	TIEMPO _{subida} (s)	V _{subida} (m/s)
R_15_1	130	0,0347	0,024333	1,42468
R_15_2	122	0,0321	0,018222	1,76190
R_15_3	129	0,0344	0,024555	1,40094
R_20_1	128	0,0337	0,019111	1,76256
R_20_2	129	0,0344	0,021444	1,60418
R_20_3	128	0,0341	0,019778	1,72582
R_25_1	140	0,0373	0,028111	1,32807
R_25_3	137	0,0365	0,023889	1,52930
R_25_4	134	0,0357	0,021222	1,68379
R_30_1	151	0,0403	0,027778	1,44959
R_30_2	147	0,0392	0,028333	1,38355
R_30_3	150	0,0400	0,036222	1,10430
R_30_4	144	0,0384	0,032000	1,20000
R_30_5	148	0,0400	0,045334	0,88234

Datos para la obtención de velocidad de retroceso de la cámara.

ENSAYO	despl _{pto superior} (m)	despl _{pto superior TORRE} (m)	despl _{pto inferior} (m)	tiempo _{impacto}
R_15_1	0,0083	0,0070	0,0040	0,011222
R_15_2	0,0066	0,0064	0,0055	0,009222
R_15_3	0,0077	0,0070	0,0043	0,011445
R_20_1	0,0074	0,0079	0,0050	0,010666
R_20_2	0,0080	0,0078	0,0053	0,011667
R_20_3	0,0075	0,0080	0,0053	0,010889
R_25_1	0,0104	0,0107	0,0069	0,016555
R_25_3	0,0101	0,0098	0,0061	0,014111
R_25_4	0,0099	0,0097	0,0061	0,012222
R_30_1	0,0131	0,0126	0,0085	0,018334
R_30_2	0,0120	0,0130	0,0080	0,018111
R_30_3	0,0131	0,0145	0,0093	0,022111
R_30_4	0,0123	0,0127	0,0088	0,019889
R_30_5	0,0135	0,0126	0,0089	0,022444

Desplazamientos superior e inferior y tiempo de impacto.

ENSAYO	V _{bajada} (m/s)	V _{subida} (m/s)	V _{impacto media} (m/s)	V _{subida media} (m/s)	E _{impacto} (J)	E _{impacto media} (J)
R_15_1	2,10	1,42			13,56	
R_15_2	2,11	1,76	2,11	1,53	13,61	13,58
R_15_3	2,11	1,40			13,58	
R_20_1	2,47	1,76			18,65	
R_20_2	2,47	1,60	2,47	1,70	18,77	18,72
R_20_3	2,47	1,73			18,76	
R_25_1	2,75	1,33			23,25	
R_25_3	2,76	1,53	2,76	1,51	23,39	23,39
R_25_4	2,77	1,68			23,54	
R_30_1	3,06	1,45			28,69	
R_30_2	3,06	1,38			28,69	
R_30_3	3,07	1,10	3,06	1,20	28,85	28,68
R_30_4	3,05	1,20			28,58	
R_30_5	3,06	0,88			28,62	

Valores medios de velocidad y energía de impacto.

ENSAYO	V _{impacto media} (m/s)	V _{subida media} (m/s)	E _{absorbida media} (J)
R_15_1			
R_15_2	2,11	1,53	6,42
R_15_3			
R_20_1			
R_20_2	2,47	1,70	9,89
R_20_3			
R_25_1			
R_25_3	2,76	1,51	16,37
R_25_4			
R_30_1			
R_30_2			
R_30_3	3,06	1,20	24,24
R_30_4			
R_30_5			

Cálculo de la Energía absorbida a partir de los datos de la Cámara de Alta Velocidad.

ENSAYO	$E_{\text{impacto media (J)}}$	$E_{\text{absorbida media (J)}}$ método 1-cámara	$E_{\text{absorbida (J)}}$ método 2-integrales torre de caída
R_15_1 R_15_2 R_15_3	13,58	6,42	9,13
R_20_1 R_20_2 R_20_3	18,72	9,89	10,55
R_25_1 R_25_3 R_25_4	23,39	16,37	18,67
R_30_1 R_30_2 R_30_3 R_30_4 R_30_5	28,68	24,24	25,52

Energía de impacto para cada ensayo. Energía absorbida hallada con los datos de la cámara y con los datos de los ficheros.

ENSAYO	despl.máximo EXTENSÓMETRO (mm)	despl.medio EXTENSÓMETRO (mm)
R_15_1 R_15_2 R_15_3	7,04 4,77 6,31	6,04
R_20_1 R_20_2 R_20_3	7,82 6,89 5,71	6,81
R_25_1 R_25_3 R_25_4	13,78 9,18 8,48	10,48
R_30_1 R_30_2 R_30_4 R_30_5	16,89	16,89
R_contol1 R_contol2 R_control3	6,51 7,86 8,76	7,71

Valores de desplazamiento máximo obtenidos con el extensómetro.

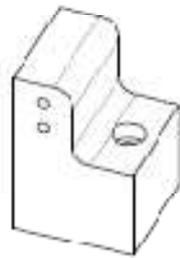
ENSAYO	F _{BAI} máxima (N)	F _{BAI} máxima media (N) Fcontrol max (N)	despl.-máximo MÁQUINA (mm)	despl.-medio MÁQUINA (mm)
R_15_1	3042	3156,33	11,77	10,14
R_15_2	3681		8,16	
R_15_3	2746		10,48	
R_20_1	3331	3165	11,79	10,38
R_20_2	3114		10,45	
R_20_3	3050		8,89	
R_25_1	2266	2488	17,74	14,46
R_25_3	2256		13,05	
R_25_4	2942		12,59	
R_30_1	1927	1823,5	16,92	18,46
R_30_2	1978		19,45	
R_30_4	1923		18,58	
R_30_5	1466		18,89	
R_contol1	3999		3867,67	
R_contol2	3711	12,27		
R_control3	3353	13,59		

Valores de fuerza y desplazamiento máximos obtenidos con la Máquina de Ensayos Universal.

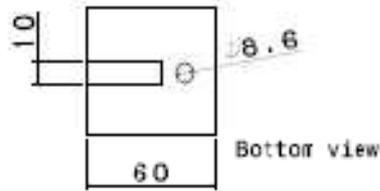
Energía de impacto teórica		Energía de impacto Cámara	
Energía (J)	Nº ensayo	E (J)	E _{media} (J)
15	R_15_1	13,56	13,58
	R_15_2	13,61	
	R_15_3	13,58	
20	R_20_1	18,65	18,72
	R_20_2	18,77	
	R_20_3	18,76	
25	R_25_1	23,25	23,39
	R_25_3	23,39	
	R_25_4	23,54	
30	R_30_1	28,69	28,68
	R_30_2	28,69	
	R_30_3	28,85	
	R_30_4	28,58	
	R_30_5	28,62	

Energía de impacto de la cámara obtenida en cada ensayo.

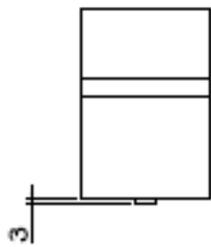
Útil para ensayos dinámicos



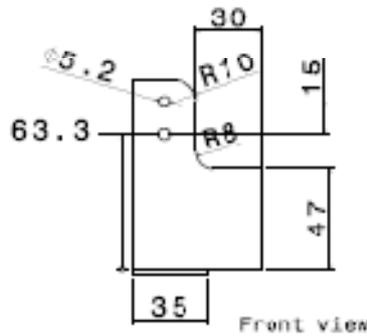
Isometric view



Bottom view



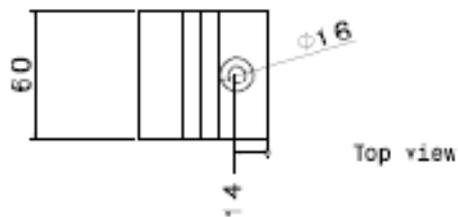
Right view



Front view

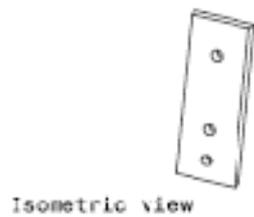


Left view

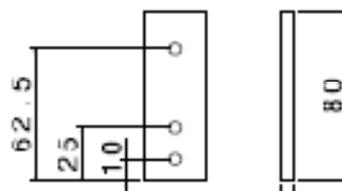


Top view

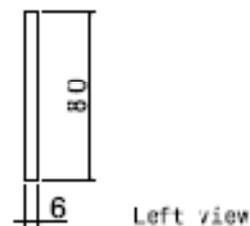
Placas de fijación de los ensayos dinámicos



Isometric view



Front view



Left view



Top view

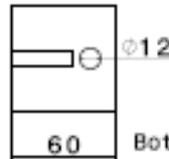
Útil para ensayos estáticos



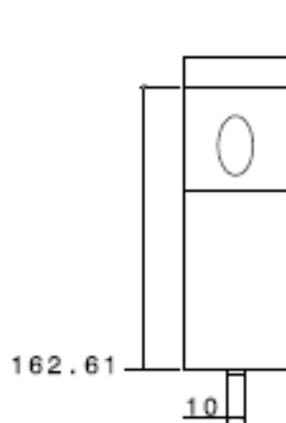
Isometric view



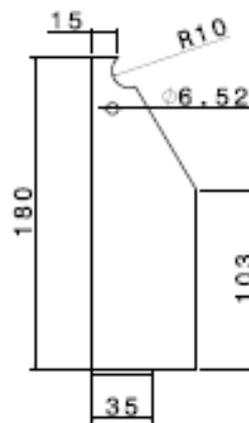
Cilindro del útil



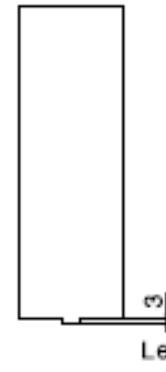
Bottom view



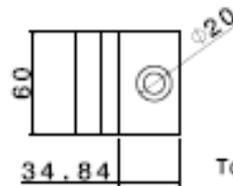
Right view



Front view

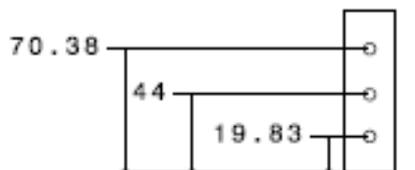


Left view

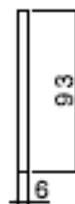


Top view

Placas de fijación de los ensayos estáticos



Front view



Left view



Isometric view



Top view

