



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



EPS

Escuela Politécnica Superior
Universidad de Málaga

TRABAJO FIN DE GRADO

**CARACTERIZACIÓN Y SIMULACIÓN DEL
COMPORTAMIENTO ANTE IMPACTO DE ESTRUCTURAS
COMPUESTAS TIPO SÁNDWICH. PROPUESTA
METODOLÓGICA PARA UN CASO REAL: PALA DE PÁDEL**

Grado en

Ingeniería Mecánica

Autor: SERGIO CABALLERO ENCINAS

Tutor: GERMÁN CASTILLO LÓPEZ

Cotutor: FELIPE GARCÍA SÁNCHEZ

Septiembre de 2.016

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



EPS

Escuela Politécnica Superior
Universidad de Málaga

TRABAJO FIN DE GRADO

**CARACTERIZACIÓN Y SIMULACIÓN DEL
COMPORTAMIENTO ANTE IMPACTO DE ESTRUCTURAS
COMPUESTAS TIPO SÁNDWICH. PROPUESTA
METODOLÓGICA PARA UN CASO REAL: PALA DE PÁDEL**

La aprobación de este trabajo permite la obtención del título:

Ingeniería Mecánica

Autor/es: **SERGIO CABALLERO ENCINAS**

Tutor: **GERMÁN CASTILLO LÓPEZ**

Cotutor: **FELIPE GARCÍA SÁNCHEZ**

Septiembre de 2.016



EPS
Escuela Politécnica Superior
Universidad de Málaga

CARACTERIZACIÓN Y SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ANTE IMPACTO DE ESTRUCTURAS COMPUESTAS TIPO SÁNDWICH. PROPUESTA METODOLÓGICA PARA UN CASO REAL: PALA DE PÁDEL

Sergio Caballero Encinas y Germán Castillo López / Felipe García Sánchez | Profesores

Ingeniería Mecánica

Trabajo Fin de Grado

Palabras Clave | **pala de pádel, elementos finitos, Patran, Nastran, LS-Dyna, LS-PrePost, materiales compuestos, fibra de vidrio, espuma polimérica, dinámica explícita, SOL700, Micromecánica.**

Caracterización y simulación del comportamiento ante impacto de estructuras compuestas tipo sándwich. propuesta metodológica para un caso real: pala de pádel

El auge del pádel en los últimos años ha propiciado un desarrollo de todos los productos relacionados con él. En este contexto se establece un convenio de colaboración entre la Universidad de Málaga y la empresa Shark Pádel. En este marco se realiza el estudio de la pala de pádel Marvel de dicha empresa.

Los primeros capítulos introducen al lector en el desarrollo de este trabajo. Se describe de forma genérica la pala de pádel y de forma concreta la pala de pádel Marvel así como su proceso de fabricación por moldeo por contacto. Se realiza una introducción de los materiales que componen la pala (fibra de vidrio y carbono para las pieles, y espuma polimérica para el núcleo) de forma que los capítulos siguientes de caracterización de los mismos sea de fácil comprensión.

La caracterización de los materiales empleados en la fabricación de la pala, fibra de vidrio y espuma polimérica, presenta una gran importancia en el estudio del comportamiento de la pala. Se realizan ensayos de tracción y cizalladura, así como ensayos para obtención del porcentaje de fibra en volumen para la

caracterización de las pieles y ensayos de compresión e impacto para la caracterización del núcleo. Posteriormente se realiza una estimación de las propiedades del material compuesto mediante uso de la Micromecánica.

Se realiza un ensayo de control de calidad sobre la pala Marvel en la máquina de impactos CEAST 9350 con el objetivo de estudiar su repetitividad.

Se desarrolla un modelo numérico mediante el método de los elementos finitos para estudiar el comportamiento de la pala frente a una sollicitación de impacto. El modelo no pretende ser una recreación del ensayo de impacto experimental realizado, sino una herramienta para estudiar la influencia de las características de los materiales que conforman la pala. Para la realización de dicho modelo se ha empleado Patran como preprocesador, Nastran como módulo de cálculo, en concreto el SOLVER 700 de Nastran; y se ha utilizado como posprocesador LS-PrePost de LS-Dyna. El método de discretización temporal es el método explícito.

Finalmente se pone de manifiesto el alto grado de complejidad del análisis de un problema de impactos y se proponen una serie de trabajos futuros que profundicen y continúen el trabajo aquí expuesto.

CHARACTERIZATION AND SIMULATION OF THE BEHAVIOR OF COMPOSITE SANDWICH STRUCTURES TO IMPACT. METHODOLOGICAL PROPOSAL FOR A REAL CASE : PADDLE RACKET

Sergio Caballero Encinas y Germán Castillo López / Felipe García Sánchez | Professor

Mechanical Engineering

Dissertation

Key words: paddle racket, finite elements, **Patran, Nastran, LS-Dyna, LS-PrePost, composite, materiales compuestos, fiberglass fibra de vidrio, espuma polimérica, dinámica explícita, SOL700, Micromecánica.**

Characterization and simulation of the behavior of composite sandwich structures to impact. Methodological proposal for a real case : Paddle Racket

The boom of paddle in the recent years has promoted a significant development of all the products related to it. In this context a collaboration deal is established between the University of Malaga and the Shark Pádel company. In this context the study of the paddle racket of that company is done.

The first chapters introduce the reader in the development of this work. The paddle racket is described in a general way and specifically the Marvel paddle racket and also, the process of factoring by contact molding. The materials needed to make a paddle racket are fiberglass for skin sheets and polymeric foam for the core. The following chapters describe them in order to make them easily comprehended by the reader.

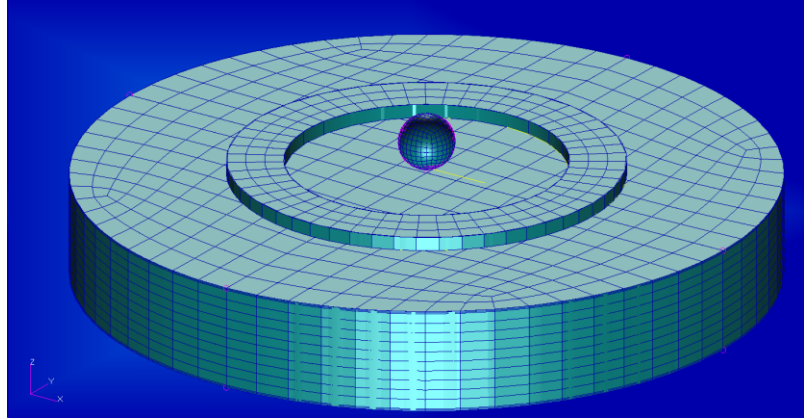
The characterization of the materials used in the factoring of the paddle racket, fiberglass and polymeric foam, shows a great importance in the study of the paddle racket behavior. Tensile and shear tests are done and also tests to obtain the percentage of fiberglass volume for the characterization of the skin sheets and the compression and impact tests for the characterization of the core. Afterwards, an estimation of the composite material properties by the use of Micromechanics is done.

A control quality test about the Mavel paddle racket is done in the impact machine "CEAST 9350" with the aim of study its repetitiveness. A numerical model based on the finite element method is develop in order to study the behavior of the paddle racket as in response to an impact solicitation. The model does not pretend to be a recreation of experimental impact test done but to be a tool in order to study the influence of the materials characteristics that shape the paddle. To make this model, Patran has been used as a preprocessor, and Nastran as a calculus module (SOLVER 700 of Nastran) and as postprocessor, the LS-PrePost of LS- Dyna. The method of temporal discretization is the explicit method.

In the end, it shows the high level of complexity of the analysis of the impact problem and series of future work are proposed in order to deepen and continue the studies displayed here.



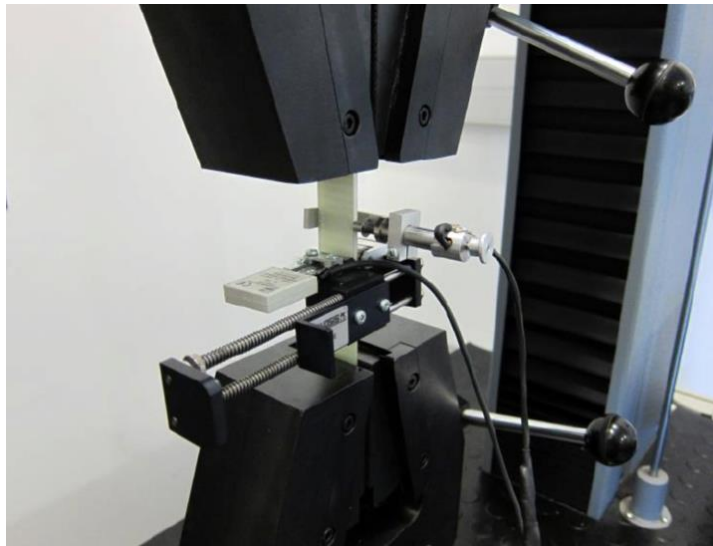
Pala de pádel Marvel / Marvel Paddle racket.



Modelo numérico desarrollado / Developed numerical model.



Sistema de impacto vertical CEAS 9350 (Instron®) / Vertical impact system CEAST 9350 (Instron®)



Ensayo de tracción / Tensile test.

Agradecimientos

A mis padres, soy quien soy gracias a ellos.

A mi hermano, mi ejemplo y espejo.

A mis tutores, Dr. D. Germán Castillo López y Dr. D. Felipe García Sánchez por su trato cercano y dedicación, sin ellos la realización de este trabajo hubiera resultado imposible.

A Manuel José Herrera Fernández, José Cifuentes Melchor y José Bernardo Beltrán Ramos cuya paciencia y buen hacer han permitido culminar este trabajo de forma satisfactoria.

A Carlos David González Gómez, siempre dispuesto a ayudar. Sin ti, todo hubiera sido más difícil estos años.

Índice de contenido

Capítulo 0	Introducción.....	20
1	Antecedentes.....	20
2	Objeto	20
3	Convenio con Shark Pádel.....	21
Capítulo 1	La pala de pádel.....	22
1	Introducción.....	22
2	Partes de la pala de pádel.....	22
3	Materiales con los que se elaboran las palas de pádel.....	23
4	Clasificación de la pala según su peso	24
5	Clasificación de la pala según su forma	24
6	Clasificación de la pala según su balance.....	25
7	Clasificación de la pala según su tamaño	25
8	Normativa	26
Capítulo 2	Materiales empleados	27
1	Introducción.....	27
2	Materiales compuestos	27
2.1	Definición.....	27
2.2	Aplicaciones	27
2.3	Clasificación de los materiales compuestos.....	28
2.4	Definición de lámina y laminado.....	31
2.5	Comportamiento de los materiales compuestos de fibra.....	31
2.6	Notación	32
2.7	Obtención de las características mecánicas de una lámina	33
2.8	Tipos de refuerzo de tejido.....	39
3	Espumas poliméricas	40
3.1	Introducción	40
3.2	Proceso de fabricación	40
3.3	Comportamiento mecánico (F. Ashby, y otros, 1998).....	40
3.4	Influencia de la velocidad de deformación, estructura interna y densidad. .	43
Capítulo 3	Pala Marvel.....	45
1	Introducción.....	45
2	Descripción geométrica	45

3	Materiales empleados	46
4	Proceso de fabricación.....	46
4.1	Preparación de las capas de fibra y corte de la espuma.	46
4.2	Mezcla endurecedor-resina.	48
4.3	Impregnación del molde con desmoldeante: cera.	48
4.4	Colocación de tres capas de fibra de vidrio sobre la base del molde.....	49
4.5	Colocación de fibra de carbono en la zona del puente.....	50
4.6	Preparación de la preforma de fibra de carbono y colocación del misma....	50
4.7	Mismo procedimiento con la otra mitad del molde. Cierre del molde.....	51
4.8	Se introduce el molde en una caja para darle consistencia al conjunto.....	52
Capítulo 4	Caracterización mecánica de las pieles.	54
1	Introducción.....	54
2	Fabricación de las probetas.....	54
2.1	Materiales empleados:.....	54
2.2	Proceso de fabricación:	54
3	Determinación de los porcentajes de fibra en volumen.....	55
3.1	Quemado. Determinación del porcentaje de fibra de vidrio en volumen....	55
3.2	Digestión. Determinación del porcentaje de fibra de carbono.	56
4	Ensayo de tracción.....	60
4.1	Objetivo.....	60
4.2	Fundamento y norma.....	60
4.3	Probeta.....	60
4.4	Maquinaria y software.....	61
4.5	Tratamiento de datos	64
4.6	Resultados	65
4.7	Resumen de resultados	68
5	Ensayo de cizalladura	69
5.1	Objetivo.....	69
5.2	Fundamento.....	69
5.3	Probeta.....	70
5.4	Maquinaria y software.....	70
5.5	Tratamiento de datos	70
5.6	Resultados	71
5.7	Resumen de resultados	73
6	Estimación de propiedades mediante Micromecánica.....	74

6.1	Procedimiento.....	74
6.2	Laminado de fibra de carbono (<i>T300/52</i>).....	75
6.3	Laminado de fibra de vidrio (<i>E-g/ep</i>).....	76
7	Conclusiones.....	76
Capítulo 5 Caracterización de los núcleos		77
1	Introducción.....	77
2	Fabricación de las probetas.....	77
3	Cálculo aproximado de densidad.....	77
4	Ensayo de compresión	78
4.1	Objetivo.....	78
4.2	Fundamento.....	78
4.3	Maquinaria y software.....	78
4.4	Tratamiento de datos	79
4.5	Resultados	80
4.6	Resumen de resultados	82
5	Ensayos de impacto	82
5.1	Objetivo.....	82
5.2	Fundamento.....	82
5.3	Maquinaria	83
5.4	Tratamiento de datos	88
5.5	Resultados	90
5.6	Resumen de resultados	91
6	Conclusiones.....	91
Capítulo 6 Definición de ensayo de control de calidad de las palas fabricadas.....		92
1	Introducción.....	92
2	Definición del control de calidad	92
3	Resultados.....	95
3.1	Comparación de impactos sobre misma cara	95
3.2	Comparación de impactos sobre la misma pala, pero por caras distintas ...	96
3.3	Comparación de impacto entre las tres palas	96
3.4	Resumen.....	97
4	Conclusiones y líneas futuras.	97
Capítulo 7 Puesta a punto de técnica de simulación de impacto.....		98
1	Introducción.....	98
1.1	Objetivo del capítulo.	98

1.2	Elementos finitos y cálculo no lineal.	98
1.3	Discretización temporal. Métodos explícito e implícito.....	100
1.4	Modos de hourglass o de energía nula.	104
2	Justificación del uso de Patran-Nastran Sol 700 (LS-Dyna)	105
3	Planteamiento general de un problema de elementos finitos y conceptos básicos.....	106
3.1	Geometría	106
3.2	Mallado	106
3.3	Material	106
3.4	Definición del elemento	106
3.5	Condiciones de contorno.....	108
3.6	Control del paso del tiempo.....	108
4	Ejemplo de problema: Zabala	109
4.1	Nociones básicas de Patran	109
4.2	Elección del tipo de análisis	110
4.3	Geometría.....	110
4.4	Mallado	113
4.5	Condiciones de contorno.....	115
4.6	Definición del material.....	118
4.7	Definición del elemento	122
4.8	Análisis.....	124
4.9	Generación de archivo <i>.bdf</i>	129
Capítulo 8	Simulación mediante elementos finitos del comportamiento a impacto de las palas de pádel Marvel.....	130
1	Introducción	130
2	Planteamiento.....	130
2.1	Geometría.....	130
2.2	Probeta.....	131
2.3	Esfera.....	131
2.4	Anillos	131
2.5	Materiales	131
2.6	Condiciones de contorno.....	133
2.7	Mallado	134
2.8	Definición del elemento	135
3	Proceso de convergencia	136
3.1	Convergencia del mallado del espesor del núcleo.....	136
3.2	Convergencia del mallado del radio de la probeta	137
3.3	Convergencia del mallado del espesor de la piel.....	138
3.4	Convergencia del mallado de los anillos de contactos	138

3.5	Convergencia del mallado de la esfera.....	139
4	Estudio de influencia de material	140
4.1	Piel.....	140
4.2	Núcleo	141
5	Conclusiones	142
Capítulo 9	Correlación numérico-experimental.....	143
1	Introducción	143
2	Impacto experimental.....	143
3	Comparación	143
4	Análisis de discrepancias	144
5	Conclusiones	144
Capítulo 10	Conclusiones	146
Capítulo 11	Líneas futuras.....	148
Capítulo 12	Bibliografía.....	149
Anexo A	Manual de LS-PrePost	151
1	Introducción	151
2	Cargar resultados.....	151
3	Visualización de resultados.....	152
3.1	Fuerza de contacto.....	152
3.2	Zona delaminada	153
Anexo B	Ensayos de tracción y cizalladura.....	155
4	Ensayos de tracción.....	155
4.1	Ensayos de tracción probetas de fibra de carbono.....	155
4.2	Ensayos de tracción probetas de fibra de vidrio.....	160
5	Ensayos de cizalladura	165
5.1	Ensayos de cizalladura probetas de fibra de carbono.....	165
5.2	Ensayos de cizalladura probetas de fibra de vidrio	168
Anexo C	Ensayos de caracterización del núcleo.....	171
6	Ensayos de compresión.....	171
6.1	Ensayos de compresión desplazamiento libre.....	171
6.2	Ensayos de compresión desplazamiento restringido.....	174
7	Ensayos de impacto.....	177
Anexo D	Fichas técnicas	182
Planos	190

Índice de tablas

Tabla 3-1 Propiedades espuma de polietileno.	46
Tabla 3-2 Propiedades de la matriz.	46
Tabla 4-1 Propiedades de la matriz.	54
Tabla 4-2 Ensayo de quemado.....	56
Tabla 4-3 Ensayo de digestión.....	59
Tabla 4-4 Resultados ensayos de tracción.	68
Tabla 4-5 Resultados ensayos de cizalladura.	73
Tabla 4-6 Propiedades estimadas de la fibra de carbono.....	75
Tabla 4-7 Propiedades estimadas de la fibra de vidrio.....	76
Tabla 5-1 Cálculo de la densidad aparente.....	78
Tabla 5-2 Resumen de resultados ensayo de compresión sobre el núcleo.	82
Tabla 5-3 Parámetros límite CEAST 9350 (ITW Test and Instrument Italia S.r.l- INSTRON CEAST Division, 2014)	86
Tabla 5-4 Rangos de operación CEAST 9350 (ITW Test and Instrument Italia S.r.l- INSTRON CEAST Division, 2014)	86
Tabla 5-5 Resumen de resultados ensayos de impacto para caracterización del núcleo. 91	
Tabla 6-1 Masa del impactor.	92
Tabla 6-2 Resumen de resultados impactos sobre palas.....	97
Tabla 7-1 Tipo de elementos SOL 700.....	107
Tabla 7-2 Parámetros de la tarjeta MATD001 Isotropic Elastic - SOL 700	119
Tabla 7-3 Tarjeta MATD001 a introducir en el archivo de análisis (.bdf).....	119
Tabla 7-4 Parámetros de la tarjeta MATORT Elastic 3D Orthotropic Material Properties.	120
Tabla 7-5 Tarjeta MATORT a introducir en el archivo de análisis (.bdf).....	120
Tabla 7-6 Parámetros de la tarjeta MATD185 Tvergaard and Hutchinson Cohesive Model Material Properties	121
Tabla 7-7 Tarjeta MATD185 a introducir en el archivo de análisis (.bdf).....	121
Tabla 7-8 Principales parámetros de la tarjeta PSOLIDD.....	123
Tabla 8-1 Propiedades de la pala Marvel para modelo numérico.	132
Tabla 8-2 Masa del impactador.	132
Tabla 8-3 Propiedades de la esfera.	133
Tabla 8-4 Propiedades de los anillos de jujección.....	133
Tabla 8-5 Elemento CHEXA8.....	135
Tabla 8-6 Convergencia del mallado del espesor del núcleo.	136
Tabla 8-7 Convergencia del mallado del radio de la probeta	137
Tabla 8-8 Convergencia del mallado del espesor de la piel.	138
Tabla 8-9. Convergencia del mallado de los anillos de contactos.....	138
Tabla 8-10 Convergencia del mallado de la esfera.....	139

Índice de Figuras

Figura 1.1 Partes de la pala de pádel (Mora Serrano, Consultado en 2016)	22
Figura 1.2 Formas de la pala de pádel (Mora Serrano, Consultado en 2016)	24
Figura 1.3 Balance de las palas de pádel (Sánchez-Alcaraz Martínez, 2013).....	25
Figura 2.1 Representación esquemática de materiales compuestos reforzados con partículas y fibras.....	29
Figura 2.2 Clasificación de los materiales compuestos (París Caballero, y otros, 2006).	30
Figura 2.3 Caracterización analítica de Materiales Compuestos (París Caballero, y otros, 2006).....	32
Figura 2.4 Modelo Isodeformación.	33
Figura 2.5 Modelo Isotensión.....	34
Figura 2.6 Modelos para la consecución de las propiedades de materiales compuestos según sus constituyentes.....	35
Figura 2.7 Esquema de material compuesto laminado unidireccional.	36
Figura 2.8 Esquema de material compuesto laminado unidireccional en el plano XY..	36
Figura 2.9 Esquema de material compuesto laminado unidireccionalmente en el plano XZ.....	37
Figura 2.10 Esquema de material compuesto laminado unidireccional en el plano YZ.	37
Figura 2.11 Esquema de material compuesto laminado con refuerzo tejido.....	38
Figura 2.12 Esquema de material compuesto laminado con refuerzo de tejido en el plano XY.	38
Figura 2.13 Esquema de material compuesto laminado con refuerzo de tejido en el plano XZ e YZ.....	39
Figura 2.14 Tejido Tafetán y Sarga	39
Figura 2.15 Espumas poliméricas, mostrando las celdas poliédricas. Algunas espumas tienen celdas cerradas y otras celdas abiertas (F. Ashby, y otros, 1998).....	41
Figura 2.16 Curva tensión-deformación a compresión para espuma polimérica. Pueden producirse grandes deformaciones a compresión, ya que la espuma absorbe gran cantidad de energía cuando es aplastada (F. Ashby, y otros, 1998).....	41
Figura 2.17 La flexión de las paredes de las celdas proporciona la parte elástica lineal de la curva tensión-deformación (F. Ashby, y otros, 1998).	42
Figura 2.18 Fallo por pandeo de las paredes de la celda, dando lugar a la zona de meseta (F. Ashby, y otros, 1998).....	42
Figura 2.19 Fallo plástico de las paredes de la celda (F. Ashby, y otros, 1998).	43
Figura 2.20 Módulo elástico de la meseta para diferentes densidades de espuma en función de la velocidad de deformación (Bouix, y otros, 2008).	44
Figura 3.1 Geometría pala de pádel Marvel.	45
Figura 3.2 Distribución de material en el espesor de la pala.....	45
Figura 3.3 Preforma de la pared.	46
Figura 3.4 Corte del tejido de fibra para cara de golpeo..	47
Figura 3.5 Corte de tejido de fibra de carbono para puente. y empuñadura.....	47
Figura 3.6 Distribución de las piezas de fibra sobre el molde.....	48

Figura 3.7 Preforma de fibra de carbono para formar el marco.	48
Figura 3.8 Impregnación con resina de las capas de fibra de vidrio.	49
Figura 3.9 Colocación de fibra de carbono en la zona del puente.	50
Figura 3.10 Impregnación con resina de la preforma de fibra de carbno.	50
Figura 3.11 Colocación de la preforma de fibra de carbono para formar el marco de la pala.	51
Figura 3.12 Cierre del molde.	51
Figura 3.13 Molde dentro de caja.	52
Figura 3.14 Cierre de la caja con molde en su interior.	52
Figura 3.15 Tubos de plástico para el llenado de aire de la preforma del marco.	53
Figura 3.16 Pala Marvel, sin pintar y sin taladros a la izquierda. Pala Marvel terminada a la derecha.	53
Figura 4.1 Crisoles con muestra.	55
Figura 4.2 Erlenmeyer en baño termostático y control de la temperatura.	58
Figura 4.3 Fibras de carbono después del proceso de digestión.	58
Figura 4.4 Probeta ensayo de tracción normalizada.	60
Figura 4.5 Probetas ensayos de tracción utilizadas en valores nominales.	61
Figura 4.6 Máquina de ensayos Servosis ME-405/10.	61
Figura 4.7 Extensómetros longitudinal y transversal.	61
Figura 4.8 Salidas de los auxiliares.	62
Figura 4.9 Selección de la célula de trabajo.	62
Figura 4.10 Configuración parámetros del ensayo de tracción.	63
Figura 4.11 Datos obtenidos del ensayo de tracción.	64
Figura 4.12 Tratamiento datos ensayo de tracción	64
Figura 4.13 Curva σ - ϵ_x probeta 1, fibra de carbono.	65
Figura 4.14 Curva ϵ_x - ϵ_y probeta 1, fibra de carbono.	65
Figura 4.15 Probetas carbono, ensayo de tracción.	66
Figura 4.16 Curva σ - ϵ_x probeta 1, fibra de vidrio.	66
Figura 4.17 Curva ϵ_x - $(-\epsilon_y)$ probeta 1, fibra de vidrio.	67
Figura 4.18 Probetas fibra de vidrio, ensayo de tracción.	67
Figura 4.19 Tracción a 45°.	69
Figura 4.20 Tratamiento de los datos ensayo de cizalladura.	70
Figura 4.21 Obtención de la deformación angular y la tensión de cizalladura mediante Mohr.	70
Figura 4.22 Tratamiento de los datos ensayo de cizalladura.	71
Figura 4.23 Curva σ_s - ϵ_s probeta 1, fibra de carbono.	71
Figura 4.24 Reorientación de las fibras de carbono.	71
Figura 4.25 Curva σ_s - ϵ_s probeta 1, fibra de carbono.	72
Figura 5.1 Probetas de espuma polimérica.	77
Figura 5.2 Ensayo de compresión, desplazamiento restringido.	79
Figura 5.3 Utillaje para aplicación de carga de forma homogénea, utensilio para restringir los movimientos de la espuma y varilla para extraer la espuma.	79
Figura 5.4 Curva σ - ϵ , probeta 2. desplazamiento libre, velocidad 5 mm/s	80
Figura 5.5 Curva σ - ϵ , probeta 5. desplazamiento libre, velocidad 0,83 mm/s	81
Figura 5.6 Curva σ - ϵ , probeta 8. desplazamiento restringido, velocidad 5 mm/s	81

Figura 5.7 Curva σ - ϵ , probeta 11. desplazamiento restringido, velocidad 0.83 mm/s..	82
Figura 5.8 Partes de CEAST 9350 (ITW Test and Instrument Italia S.r.l-INSTRON CEAST Division, 2014)	83
Figura 5.9 Elementos de la torreta (ITW Test and Instrument Italia S.r.l-INSTRON CEAST Division, 2014).	84
Figura 5.10 Detector óptico (ITW Test and Instrument Italia S.r.l-INSTRON CEAST Division, 2014).	85
Figura 5.11 Distancias de trabajo (ITW Test and Instrument Italia S.r.l-INSTRON CEAST Division, 2014).	86
Figura 5.12 Configuración de los parámetros del ensayo.	87
Figura 5.13 Pantalla de visualización del ensayo de impacto	88
Figura 5.14 Datos obtenidos del ensayo de impacto para caracterización de los núcleos.	88
Figura 5.15 Curva Fuerza [N]-Tiempo [ms].	89
Figura 5.16 Curva σ - ϵ .	90
Figura 5.17 Primer tramo de la curva σ - ϵ .	90
Figura 5.18 Comparación de la influencia de la velocidad de deformación sobre la rigidez del núcleo.	91
Figura 6.1 Palas de ensayo.	92
Figura 6.2 Elementos del impactador.	93
Figura 6.3 Impactor en forma de "seta".	94
Figura 6.4 Utillaje de colocación.	94
Figura 6.5 Comparación de impactos sobre cara A.	95
Figura 6.6 Comparación de impacto sobre cara B.	95
Figura 6.7 Comparación de impactos sobre la misma pala, caras distintas.	96
Figura 6.8 Comparación de impacto entre las tres palas.	96
Figura 7.1 Comportamiento lineal y elástico.	99
Figura 7.2 Algoritmo de resolución explícito (MSC Software Corporation , 2012)....	101
Figura 7.3 Algoritmo de resolución explícito 2 (MSC Software Corporation , 2012).	103
Figura 7.4 Aumento del coste computacional (ordenadas) con respecto al tamaño del problema (abscisas) (MSC Software Corporation , 2012)	104
Figura 7.5 Aumento del coste matricial (ordenadas) con respecto al tamaño del problema (abscisas) (MSC Software Corporation , 2012).	104
Figura 7.6 Modos de hourglass de un elemento tipo shell.	104
Figura 7.7 Elemento tridimensional CHEXA8	107
Figura 7.8 Esquema tesis (Zabala Rodriguez, 2014).	109
Figura 7.9 Selección de SOL 700 al crear un modelo nuevo.	110
Figura 7.10 Selección del campo de trabajo. Geometría.	110
Figura 7.11 Creación de línea en Patran.	111
Figura 7.12 Creación de superficie por revolución en Patran.	111
Figura 7.13 Creación de sólido por extrusión en Patran.	112
Figura 7.14 Operación de simetría en Patran.	112
Figura 7.15 Selección del campo de trabajo. Mallado.	113
Figura 7.16 Distribución de los elementos en la dirección del espesor.	113
Figura 7.17 Mallado de la placa.	114

Figura 7.18 Rutina para creación de esfera en Patran.	114
Figura 7.19 Selección del campo de trabajo. Condiciones de contorno.....	115
Figura 7.20 Modelo del empotramiento de la placa.	115
Figura 7.21 Velocidad inicial	116
Figura 7.22 Submenú de definición de contactos.....	117
Figura 7.23 Introducción de fuerzas de inercia.	117
Figura 7.24 Selección del campo de trabajo. Material.	118
Figura 7.25 Definición del material.....	118
Figura 7.26 Tarjeta MATD001 Isotropic Elastic-SOL 700 (MSC Nastran, 2014c) ..	119
Figura 7.27 Tarjeta MATORT Elastic 3D Orthotropic Material Properties (MSC Nastran;2014c)	120
Figura 7.28 Tarjeta MATD185 Tvergaard and Hutchinson Cohesive Model - SOL 700 (MSC NASTRAN, 2014c)	121
Figura 7.29 Selección del campo de trabajo. Propiedades del elemento.....	122
Figura 7.30 Definición de las propiedades de los elementos Patran.	122
Figura 7.31 Tarjeta PSOLIDD (MSC NASTRAN, 2014c).....	122
Figura 7.32 Selección del campo de trabajo. Análisis.....	124
Figura 7.33 Submenú del campo "Analysis".....	124
Figura 7.34 Configuración del análisis "Solution Type	124
Figura 7.35 "Execution Control Parameters"	125
Figura 7.36 "General Parameters"	126
Figura 7.37 "Time History Request"	126
Figura 7.38 Submenú "Subcases".....	127
Figura 7.39 "Contact Table".....	128
Figura 7.40 Generación del archivo .bdf	129
Figura 8.1 Modelo numérico.	130
Figura 8.2 Corte transversal del modelo numérico.....	131
Figura 8.3 Convergencia del mallado del espesor del núcleo.	136
Figura 8.4 Convergencia del mallado del radio de la probeta.	137
Figura 8.5 Convergencia del mallado del espesor de la piel.	138
Figura 8.6 Convergencia del mallado de los anillos de contactos.....	139
Figura 8.7 Convergencia del mallado de la esfera.....	139
Figura 8.8 Influencia del Módulo Elástico de la Piel.	140
Figura 8.9 Influencia del Módulo Elástico de Núcleo.....	141
Figura 8.10 Influencia del Coeficiente de Poisson.	141
Figura 9.1 Comparación curva experimenta y curva de simulación.	143
Figura 9.2 Marco de la pala de pádel.	145
Figura A.1 Cargar archivo D3PLOT en LS-PrePost.....	151
Figura A.2 Menú 2	151
Figura A.3 Selección de resultados "Time History Request"	152
Figura A.4 Visualización de la fuerza de contacto.	152
Figura A.5 Selección de los elementos objeto del estudio.	153
Figura A.6 Medición del área	154
Figura A.7 Variación del área por delaminación.....	154

Figura B.1 Curva σ - ε ensayo de tracción probeta 1 fibra de carbono.	155
Figura B. 2 Curva $\varepsilon_x - (-\varepsilon_y)$ ensayo de tracción probeta 1 fibra de carbono.	155
Figura B. 3 Curva σ - ε ensayo de tracción probeta 2 fibra de carbono.	156
Figura B. 4 Curva $\varepsilon_x - (-\varepsilon_y)$ ensayo de tracción probeta 2 fibra de carbono.	156
Figura B.5 Curva σ - ε ensayo de tracción probeta 3 fibra de carbono.	157
Figura B.6 Curva $\varepsilon_x - (-\varepsilon_y)$ ensayo de tracción probeta 3 fibra de carbono.	157
Figura B.7 Curva σ - ε ensayo de tracción probeta 4 fibra de carbono.	158
Figura B.8 Curva $\varepsilon_x - (-\varepsilon_y)$ ensayo de tracción probeta 4 fibra de carbono.	158
Figura B.9 Curva σ - ε ensayo de tracción probeta 5 fibra de carbono.	159
Figura B.10 Curva $\varepsilon_x - (-\varepsilon_y)$ ensayo de tracción probeta 5 fibra de carbono.	159
Figura B.11 Curva σ - ε ensayo de tracción probeta 1 fibra de vidrio.	160
Figura B.12 Curva $\varepsilon_x - (-\varepsilon_y)$ ensayo de tracción probeta 1 fibra de vidrio.	160
Figura B.13 Curva σ - ε ensayo de tracción probeta 2 fibra de vidrio.	161
Figura B.14 Curva $\varepsilon_x - (-\varepsilon_y)$ ensayo de tracción probeta 2 fibra de vidrio.	161
Figura B.15 Curva σ - ε ensayo de tracción probeta 3 fibra de vidrio.	162
Figura B.16 Curva $\varepsilon_x - (-\varepsilon_y)$ ensayo de tracción probeta 3 fibra de vidrio.	162
Figura B.17 Curva σ - ε ensayo de tracción probeta 4 fibra de vidrio.	163
Figura B.18 Curva $\varepsilon_x - (-\varepsilon_y)$ ensayo de tracción probeta 4 fibra de vidrio.	163
Figura B.19 Curva σ - ε ensayo de tracción probeta 5 fibra de vidrio.	164
Figura B.20 Curva $\varepsilon_x - (-\varepsilon_y)$ ensayo de tracción probeta 5 fibra de vidrio.	164
Figura B.21 Curva σ - ε ensayo de cizalladura probeta 1 fibra de carbono.	165
Figura B.22 Curva σ - ε ensayo de cizalladura probeta 2 fibra de carbono.	165
Figura B.23 Curva σ - ε ensayo de cizalladura probeta 3 fibra de carbono.	166
Figura B.24 Curva σ - ε ensayo de cizalladura probeta 4 fibra de carbono.	166
Figura B.25 Curva σ - ε ensayo de cizalladura probeta 5 fibra de carbono.	167
Figura B.26 Curva σ - ε ensayo de cizalladura probeta 1 fibra de vidrio.	168
Figura B.27 Curva σ - ε ensayo de cizalladura probeta 2 fibra de vidrio.	168
Figura B.28 Curva σ - ε ensayo de cizalladura probeta 3 fibra de vidrio.	169
Figura B.29 Curva σ - ε ensayo de cizalladura probeta 4 fibra de vidrio.	169
Figura B.30 Curva σ - ε ensayo de cizalladura probeta 4 fibra de vidrio.	170
Figura C.1 Curva σ - ε ensayo de compresión probeta 2, desplazamiento libre, velocidad 5 mm/s.	171
Figura C.2 Curva σ - ε ensayo de compresión probeta 3, desplazamiento libre, velocidad 5 mm/s.	172
Figura C.3 Curva σ - ε ensayo de compresión probeta 4 desplazamiento libre, velocidad 5 mm/s.	172
Figura C.4 Curva σ - ε ensayo de compresión probeta 5 desplazamiento libre, velocidad 0,83 mm/s.	173
Figura C.5 Curva σ - ε ensayo de compresión probeta 6 desplazamiento libre, velocidad 0,83 mm/s.	173
Figura C.6 Curva σ - ε ensayo de compresión probeta 7 desplazamiento libre, velocidad 0,83 mm/s.	174
Figura C.7 Curva σ - ε ensayo de compresión probeta 8, desplazamiento restringido, velocidad 5 mm/s.	174

Figura C.8 Curva σ - ε ensayo de compresión probeta 9 desplazamiento restringido, velocidad 5 mm/s.....	175
Figura C.9 Curva σ - ε ensayo de compresión probeta 10 desplazamiento restringido, velocidad 5 mm/s.....	175
Figura C.10 Curva σ - ε ensayo de compresión probeta 11 desplazamiento restringido, velocidad 0,83 mm/s.....	176
Figura C.11 Curva σ - ε ensayo de compresión probeta 11 desplazamiento restringido, velocidad 0,83 mm/s.....	176
Figura C.12 Curva σ - ε ensayo de compresión probeta 13 desplazamiento restringido, velocidad 0,83 mm/s.....	177
Figura C.13 Curva σ - ε ensayo de impacto probeta 17, velocidad 3 m/s.....	177
Figura C.14 Curva σ - ε ensayo de impacto probeta 18, velocidad 3 m/s.....	178
Figura C.15 Curva σ - ε ensayo de impacto probeta 19, velocidad 3 m/s.....	178
Figura C.16 Curva σ - ε ensayo de impacto probeta 20, velocidad 4 m/s.....	179
Figura C.17 Curva σ - ε ensayo de impacto probeta 21, velocidad 4 m/s.....	179
Figura C.18 Curva σ - ε ensayo de impacto probeta 22, velocidad 4 m/s.....	180
Figura C.19 Curva σ - ε ensayo de impacto probeta 14, velocidad 4,5 m/s.....	180
Figura C.20 Curva σ - ε ensayo de impacto probeta 15, velocidad 4,5 m/s.....	181
Figura C.21 Curva σ - ε ensayo de impacto probeta 16, velocidad 4,5 m/s.....	181

Capítulo 0 *Introducción*

1 Antecedentes

El deporte tiene una gran influencia sobre la sociedad actual. Se ha consagrado como una de las principales actividades de ocio del ser humano, ya sea como espectáculo deportivo o como realización práctica del mismo; y por consiguiente se ha convertido en uno de los principales motores económicos de la sociedad.

En los últimos años, la realización de la actividad física de forma cotidiana se ha establecido como una gran herramienta para la mejora de la salud. El sedentarismo instaurado en la actualidad debido a la poca exigencia física de la mayoría de los trabajos actuales, hace que la realización de una actividad física de forma cotidiana sea una necesidad. En este contexto, el desarrollo de deportes menos tradicionales ha tenido una gran importancia ya que su realización no requiere de una fuerte inversión ni de unas grandes condiciones físico-técnicas para su práctica.

Uno de estos “nuevos” deportes es el pádel. Este surge en los años ochenta del siglo XX y su práctica en España se ha extendido rápidamente debido a la facilidad para su práctica y su dinamismo.

Shark Padel es una empresa malagueña que se dedica a la producción y distribución de material deportivo relacionado con el pádel. Esta empresa busca la mejora de sus productos, porque en el ámbito deportivo cualquier pequeña ventaja competitiva que presente el producto puede marcar la diferencia.

La pala de pádel es un claro ejemplo del uso de materiales compuestos en el deporte como medio para disminuir peso sin perder propiedades mecánicas, necesarias para hacer frente a las sollicitaciones a las que se encuentra sometida, impactos. Este tipo de sollicitación dinámica genera problemas altamente no lineales y que requieren potentes programas de cálculo para su resolución. Mediante el Método de elementos finitos, en adelante MEF, se puede hacer frente a este tipo de problemas.

2 Objeto

Se redacta el presente Trabajo Fin de Grado, en adelante TFG, durante el curso académico 2015/2016, titulado Caracterización y simulación del comportamiento ante impacto de estructuras compuestas tipo sándwich. Propuesta metodológica para un caso real: Pala de Pádel, con objeto de:

1. Someter al criterio del tribunal, nombrado al efecto por la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Málaga, el trabajo desarrollado por Sergio Caballero Encinas en la asignatura TFG -de carácter obligatorio para la obtención del título de Grado- para su preceptiva evaluación.
2. Poner a punto una metodología de caracterización que permita:
 - a. Caracterizar los materiales empleados en la fabricación de palas de pádel.

- b. Analizar la influencia sobre el comportamiento de la pala de variables tales como: materiales empleados, proceso de fabricación, geometría, distribución de agujeros...
 - c. Realizar un control de calidad de la fabricación.
 - d. Poner a punto una metodología de simulación del comportamiento de la pala para analizar futuras modificaciones y/o nuevos diseños sobre el comportamiento de la pala.
3. Continuar con la línea de investigación llevada a cabo por mi tutor el Dr. D. Germán Castillo López y mi cotutor el Dr. D. Felipe García Sánchez sobre la correlación numérico experimental de problemas de impacto no lineal en sistemas multimateriales.
4. Realizar la primera toma de contacto con el sistema de impacto vertical, CEAST 9350, de la firma INSTRON[®], recientemente adquirida por la Unidad Docente de Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras, integrante del Departamento de Ingeniería Civil de Materiales y Fabricación.

3 Convenio con Shark Pádel

Este TFG surge al amparo del convenio de colaboración suscrito entre el Dr. D. Germán Castillo López, en representación de la Universidad de Málaga, y de la empresa Shark Pádel. En este contexto, la empresa ha facilitado información, materiales y palas de pádel para su estudio. Concretamente la pala de pádel que se analiza en este trabajo es la pala Marvel, descrita ampliamente en el capítulo 3 de este TFG.

Capítulo 1 La pala de pádel

1 Introducción

La pala de pádel es parte central de este TFG y como tal se ha considerado necesario la introducción de este capítulo como forma de presentarla. Se muestra su geometría y composición, así como varias clasificaciones de la misma en función de sus características y comportamiento.

2 Partes de la pala de pádel

David Mora Serrano, experto en deportes de raqueta y alto rendimiento deportivo, expone sus conocimientos acerca de la pala de pádel en su artículo: *Cómo elegir la pala de pádel adecuada*, artículo recogido en <http://www.webconsultas.com/>. (Dirección completa en bibliografía). En este artículo la pala de pádel se divide en las siguientes partes, tal y como se puede observar en la figura 1.1 (Mora Serrano, Consultado en 2016):

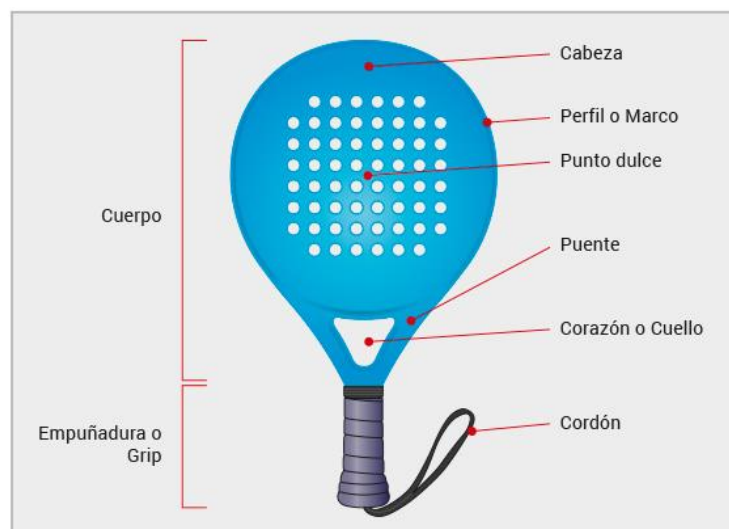


Figura 1.1 Partes de la pala de pádel (Mora Serrano, Consultado en 2016)

Empuñadura o grip

Zona comprendida entre el cordón y el comienzo del cuerpo. Sirve para que el jugador sujete la pala. Suele ser de una única talla respecto al grosor, esto hace que sea el propio jugador el que adapte el grosor de la empuñadura mediante el uso de más o menos overgrips.

Cuerpo de la pala

Zona comprendida entre el final de la empuñadura hasta el extremo superior de la pala. Se divide en las siguientes partes:

- **Corazón o cuello de la pala**
Es la parte central de la pala. Tiene forma triangular y suele presentar un agujero en el centro.
- **Puente**
Son las columnas que unen la empuñadura con el cuerpo y suelen servir para aportar flexibilidad y solidez a la pala y, en algunos casos, reducir la vibración de la misma. Los hay también de diferentes formas y grosores según el diseño de la pala de pádel.
- **Perfil o marco**
El perfil es la parte externa de la pala que delimita la superficie de golpeo
- **Cabeza de la pala o superficie de golpeo**
La cabeza de la pala o superficie de golpeo es la zona con la que se golpea la bola sin perder control sobre la misma.
- **Punto dulce**
El punto dulce es el punto óptimo de golpeo, es decir, el punto en el que golpeando a la bola a una velocidad X esta saldría despedida a mayor distancia que si la golpeas en cualquier otra parte de la cabeza. Este va a ser un factor importante a la hora de elegir la pala en función del tipo de jugador que seas y de si lo que quieres conseguir es una orientación hacia el control de la bola o hacia la potencia. (Mora Serrano, Consultado en 2016)

3 Materiales con los que se elaboran las palas de pádel.

Las palas de pádel están constituidas por diferentes elementos (Mora Serrano, Consultado en 2016):

- **Cordón**
Suele ser una cuerda de hilos trenzados adherida a la parte inferior de la pala.
- **Empuñadura**
Suele ser de plástico recubierto con un overgrip, para mejorar el agarre y sujeción para el jugador.
- **Marco o perfil de la pala**
Suele estar formado fibra de vidrio o carbono, materiales ligeros y resistentes..

- **Superficie de golpeo**

La superficie de golpeo suele estar formada por los mismos materiales que el marco, siendo de uso común materiales como la fibra de vidrio y la fibra de carbono.

- **Núcleo de la pala**

Esta parte de la pala suele estar formada por goma EVA de diferentes durezas. También puede estar formada por foam, que es un material más blando que aporta mayor potencia a los golpes. Como se ha podido observar en general, se utilizan espumas poliméricas.

- **Protector superior**

Protector de plástico adherido con adhesivo o incrustado en la parte más externa del marco con el fin de proteger a la pala de golpes con las paredes.

4 Clasificación de la pala según su peso

El peso de la pala es una variante fundamental en su comportamiento, porque influye notablemente en la potencia que le podemos imprimir a la bola en el golpeo. Por lo general una mayor masa implica una mayor potencia en el golpe, pero una pala muy pesada puede conseguir el efecto contrario ya que la potencia depende en gran medida de la velocidad con la que golpeamos y si la pala es muy pesada será difícil golpear con velocidad la bola. Por lo tanto, según su peso, podemos clasificar las palas en (Sánchez-Alcaraz Martínez, 2013):

- Ligeras: menos de 360 gramos
- Intermedias: entre 360 y 380 gramos
- Pesadas: Más de 380 gramos

5 Clasificación de la pala según su forma

Dependiendo de la forma del cuerpo de la pala, estas se pueden clasificar en Diamante, Lágrima y Redonda como se puede ver en la figura 1.2.



Figura 1.2 Formas de la pala de pádel (Mora Serrano, Consultado en 2016)

6 Clasificación de la pala según su balance

El balance de la pala es el punto de equilibrio y depende de la distribución del peso en la pala, y de la distancia a la que se encuentre el centro de gravedad de la base del puño.

A mayor distancia entre el centro de gravedad y la base del puño, más peso distribuido en la cabeza de la pala, y por lo tanto más peso aparente. Son palas más difíciles de manejar, y la utilizan por jugadores que golpean la pelota con mucha potencia. Por el contrario, a menor distancia entre el centro de gravedad y la base del puño, el peso se distribuye más hacia el corazón y puño de la pala, lo que le otorga una mayor manejabilidad.

Por lo tanto, en función del balance, podemos distinguir entre diferentes palas:

Tipo	Distancia entre el centro de gravedad y la base del puño
Balance alto	Más de 30 cm
Balance medio	Entre 28 y 30 cm
Balance bajo	Menos de 28 cm

Figura 1.3 Balance de las palas de pádel (Sánchez-Alcaraz Martínez, 2013)

Esta clasificación está ligada a la de la forma de la pala. De esta forma la pala redonda, presenta un balance bajo, mientras que las palas con forma de lágrima y diamante presenta un balance medio y alto respectivamente.

7 Clasificación de la pala según su tamaño

El tamaño de la cabeza de la pala influye directamente en el control de la misma. Las palas de gran tamaño (oversize), poseen un “punto dulce” mayor que las demás, por lo que aumenta el porcentaje de golpes que realizamos en esa zona, pero, al ser más largas las fibras de las placas que componen el núcleo de la pala, se produce una flexión mayor de las mismas, produciendo más potencia en los golpes del jugador. Por lo tanto, al aumentar la potencia del golpe, disminuye su control. (Sánchez-Alcaraz Martínez, 2013)

La manejabilidad de la pala influye también según el tamaño de su superficie de golpeo, ya que, aquellas palas con superficies mayores ofrecen mayor resistencia al aire durante el movimiento del golpe, disminuyendo su manejabilidad. De este modo, en función del tamaño podemos distinguir tres tipos de palas:

- Oversize: Mayor de 470 cm²
- Midsized: Entre 470 y 430 cm²
- Estándar: Menor de 430 cm²

8 Normativa

El Reglamento de Juego del Pádel de Federación Internacional Pádel F.I.P recoge lo siguiente (F.I.P, 2008):

“La Pala

Se jugará con una pala reglamentaria de pádel, según homologación de la FIP.

La pala se compone de dos partes: cabeza y puño.

- *Puño: largo máximo 20cm, ancho máximo (de cada una de las horquillas, sin considerar el espacio vacío entre ellas): 50mm, grosor máximo 50mm.*
- *Cabeza: largo variable.*

Ancho máximo: 26cm, grosor máximo 38mm

El largo total de la pala, cabeza más puño, no podrá exceder de 45,5 centímetros.

Al realizar el control de las medidas de la pala se permitirá una tolerancia en el grosor de la misma del 2,5%.

La superficie destinada al golpeo estará perfora por un número no limitado de agujeros cilíndricos de 9 a 13mm de diámetro cada uno en toda la zona central. Dentro de esa misma superficie podrá considerarse una zona periférica de 4 centímetros medidos desde el borde exterior de la pala, en donde los agujeros podrán tener otra forma o tamaño, siempre y cuando no afecten a la esencia del juego.

La superficie destina al golpeo, igual en sus dos caras, podrá ser plana, lisa o rugosa.

La pala estará libre de objetos adheridos y otros dispositivos, que no sean aquellos utilizados solo y específicamente para limitar o prevenir deterioros, vibraciones y distribuir el peso. Cualquier objeto o dispositivo debe ser razonable en medidas y colocación para tales propósitos

Deberá tener un cordón o correa no elástica de sujeción a la muñeca como protección contra accidente. Su uso será obligatorio. Ese cordón deberá tener una longitud máxima de 35 centímetros

La pala debe estar libre de cualquier tipo de dispositivo que pueda comunicar, avisar o dar instrucciones de cualquier tipo al jugador, ya sea de forma visible o audible, durante el transcurso de un partido.” (F.I.P, 2008)

Capítulo 2 Materiales empleados

1 Introducción

Las palas de pádel, objeto de estudio en este TFG, están constituidas por diferentes materiales dispuestos en forma de sándwich. El núcleo está constituido por una espuma polimérica y las pieles por material compuesto de fibra vidrio o fibra de carbono.

En este capítulo se pretende realizar una pequeña introducción a ambos tipos de materiales, abordando aquellos conceptos que pueden resultar interesantes para el estudio realizado.

2 Materiales compuestos

2.1 Definición

Los materiales compuestos son aquellos materiales que están constituidos por al menos dos materiales diferentes que combinan sus propiedades. Los componentes que lo conforman deben ser distinguibles físicamente y pueden ser separados por procesos mecánicos. Las fases han de ser químicamente distintas y separadas por una intercara.

Los materiales compuestos nacen de la necesidad de aunar las propiedades de dos materiales distintos. Siendo sus propiedades mecánicas superiores a la simple suma de las propiedades de sus componentes, a este concepto se le denomina sinergia.

Los materiales compuestos, de forma general, están formados por dos partes:

- Refuerzo: fase de carácter discreto que aporta las características mecánicas del material.
- Matriz: fase de carácter continuo que mantiene la cohesión del material, protege al refuerzo del medio ambiente y transmite las sollicitaciones.

Las propiedades del compuesto son función de las propiedades de las fases constituyentes, de sus proporciones relativas y de la geometría, distribución y orientación de las fases discretas.

2.2 Aplicaciones

El uso de un material en aplicaciones ingenieriles está no tanto condicionado por sus propiedades mecánicas cuanto por el costo real de su fabricación y puesta en servicio.

Dado que éste es un aspecto cuyo refinamiento tecnológico está muy condicionado por el tiempo, es lógico que los procedimientos de fabricación de los materiales compuestos (de las fibras aisladamente y del conjunto, adicionalmente) hayan condicionado, por el elevado precio que confieren al producto, el uso extensivo de este tipo de materiales. Solamente en situaciones en que el factor peso juega un papel muy importante (ingeniería del espacio) o el precio no es un obstáculo (aplicaciones deportivas), o el procedimiento de fabricación está bastante afinado (elementos de revolución), es cuando los materiales compuestos han irrumpido en el mercado con carácter extensivo. (París Caballero, y otros, 2006).

- En la industria aeroespacial la ligereza es uno de los criterios de diseño más importantes a considerar durante la selección del material, porque el peso influye directamente en su consumo. En este sector, los materiales compuestos ya suponen más de un 50% del

Caracterización y simulación del comportamiento ante impacto de estructuras compuestas tipo sándwich. Propuesta metodológica para un caso real: Pala de Pádel.

peso estructural de los aviones más modernos como Airbus A350 o el 787 Dreamliner de Boeing (Zabala Rodriguez, 2014).

- En el sector del automóvil, el uso de los materiales compuestos de carbono ha estado tradicionalmente limitado a los vehículos de competición y de alta gama. Pero en la actualidad, las restricciones sobre las emisiones y el alto precio del combustible hacen que los fabricantes busquen disminuir el peso de sus vehículos, por esta razón están apostando por el empleo de este tipo de materiales (Zabala Rodriguez, 2014).
- En la ingeniería naval se han empleado sobre todo en cascos cubiertas y mástiles, sobre todo en embarcaciones deportivas donde se requieren grandes prestaciones de los materiales a emplear y poco peso (París Caballero, y otros, 2006).
- En la industria química se están utilizando cada vez más en conducciones y recipientes a presión, consiguiendo con capas internas de resinas de propiedades específicas la adecuada resistencia a corrosión frente a agentes químicos. En estas aplicaciones se suele utilizar fibra de vidrio con resina de poliéster (París Caballero, y otros, 2006).
- Dentro de la industria deportiva el desarrollo de productos formados por materiales compuestos se encuentra en auge. El peso de la bicicleta puede marcar la diferencia entre ganar o perder una carrera. Una raqueta de tenis más pesada puede causar problemas en el codo. Debido a la importancia del peso en la práctica del deporte el uso de materiales compuestos para fabricar palas de pádel, cañas de pescar, palos de golf, esquís, canoas, pértigas, etc. se ha convertido en práctica habitual.
- Una utilización menos conocida pero muy extensa la han alcanzado los materiales compuestos, debido a sus buenas propiedades aislantes, en la ingeniería eléctrica, fabricándose con ellos paneles, cajas de interruptores, soportes, etc. (París Caballero, y otros, 2006).

2.3 Clasificación de los materiales compuestos.

Existe tal variedad de materiales compuestos que resulta difícil realizar una clasificación que sea de aceptación general. La primera cuestión es acordar con respecto a qué factor se va a realizar la clasificación.

Dado que la mayoría de los materiales compuestos fabricados lo han sido para mejorar propiedades mecánicas tales como resistencia, rigidez o tenacidad, parece razonable realizar la clasificación en torno al mecanismo que produce esa mejora, el cual depende en gran medida de la geometría del refuerzo que se introduce dentro de la matriz.

Antes de realizar una primera clasificación deben definirse términos como el de fibra y el de partícula. Una fibra se distingue porque una dimensión, su longitud, es mucho mayor que las otras dos (las características de la sección transversal). El resto de los refuerzos están agrupados como partículas pudiendo ser esféricos, cúbicos, laminares o irregulares.

Atendiendo a esto se van a tener dos tipos de materiales compuestos, los reforzados con partículas y los reforzados con fibras.

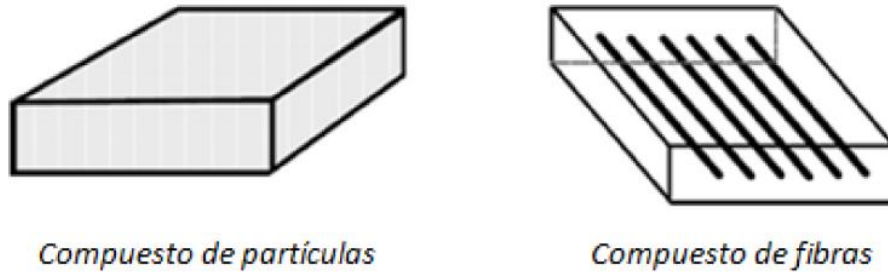


Figura 2.1 Representación esquemática de materiales compuestos reforzados con partículas y fibras.

En los materiales compuestos reforzados con partículas, el refuerzo puede tener diferentes objetivos. En general, y a diferencia de lo que sucede en los materiales compuestos reforzados con fibras, las partículas no tienden a absorber una parte importante de la carga que soporta el material, por lo que apenas se mejora la resistencia del material base que forma la matriz.

Incluso puede aparecer una disminución de resistencia como es el caso de la introducción de partículas duras en matrices frágiles, ya que se provocan concentraciones de tensiones que afectan a la resistencia de éstas. El refuerzo con partículas es, sin embargo, ampliamente usado para mejorar ciertas propiedades de los materiales base que forman las matrices como pueden ser conductividades térmicas y eléctricas, comportamiento a alta temperatura, aumentar resistencia a la abrasión, maquinabilidad, dureza, etc. En algunos casos simplemente se busca reducir el coste de fabricación. El uso de partículas en forma de láminas delgadas resulta atractivo por impartir, de manera natural, propiedades idénticas en todas las direcciones de un plano, lo que no resulta inmediato con el uso de fibras.

Los materiales compuestos reforzados con fibra van a tener mayor interés que los reforzados con partículas debido a sus excelentes propiedades mecánicas. Experimentalmente se comprueba que la resistencia real de la mayoría de estos materiales es sensiblemente inferior a la que teóricamente deberían poseer por el tipo de estructura que el material tiene. La razón de esta discrepancia está en la existencia de imperfecciones en el material, de manera que cualquier acción encaminada a la reducción de éstas tiene un efecto beneficioso sobre la resistencia (París Caballero, y otros, 2006). Los compuestos de fibras pueden, de forma amplia, clasificarse en compuestos de una sola capa o multicapa. En realidad los compuestos de una sola capa están generalmente formados también por múltiples capas, llamadas láminas, pero teniendo todas éstas las mismas propiedades y orientación de las fibras, por lo que el laminado (resultante de la unión de varias láminas) se suele llamar de una capa.

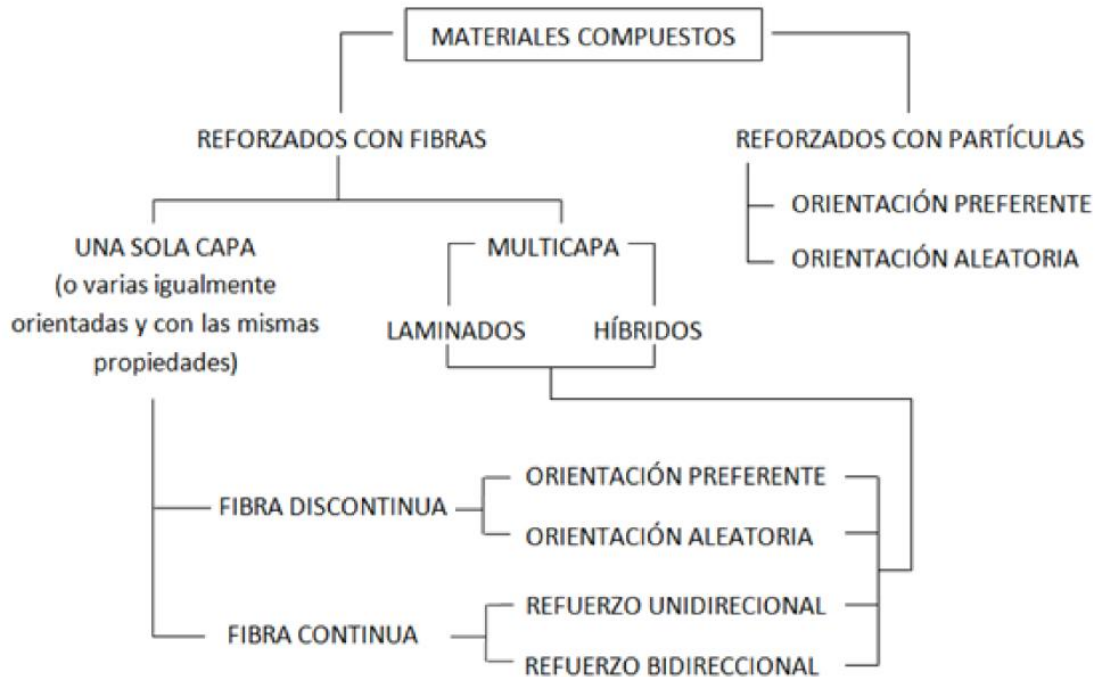


Figura 2.2 Clasificación de los materiales compuestos (París Caballero, y otros, 2006).

Cuando todas las láminas son del mismo material (misma fibra, matriz y volumen relativo de ambas), y con orientaciones diferentes debido a las necesidades de diseño, el material compuesto recibe el nombre de laminado, siendo la situación más común en ingeniería. Dada la definición de laminado, la clasificación que afecta a las láminas (o laminados de una sola capa) afecta también a los laminados, tal y como puede observarse en la figura 2.2.

El nombre de laminado híbrido se reserva para el caso en el que las láminas sean de diferentes materiales constituyentes, por ejemplo que unas láminas sean de fibra de vidrio y resina epoxi y otras de fibra de carbono y resina epoxi. Es posible, aunque no usual, que en una misma lámina se mezclen dos tipos diferentes de fibra. Laminados híbridos se han usado con éxito para la mejora de ciertas propiedades. Así, los laminados de fibra de carbono y matriz epoxi mejoran significativamente su resistencia al impacto cuando se introduce una pequeña cantidad de fibras de vidrio, con la ventaja adicional del bajo coste de éstas en comparación con las fibras de carbono.

En cuanto al concepto de fibra continua o discontinua, cualitativamente se dice que un material compuesto es de fibra discontinua o corta, cuando la longitud de la fibra afecta a las propiedades del material. En el material de fibra continua la carga es soportada fundamentalmente por las fibras, siendo la principal función de la matriz el mantener unidas a las fibras y protegerlas. El modo de fallo en estos compuestos viene gobernado por las fibras, salvo para fracciones volumétricas de fibra muy bajas.

Dentro de las láminas de fibra continua se puede tener el refuerzo en una dirección o en dos direcciones. Los compuestos unidireccionales son muy rígidos y resistentes en la dirección de la fibra pero muy débiles en la dirección perpendicular a las mismas, por lo que su uso se reduce a aplicaciones en las que trabajan estructuralmente como un tirante. Generalmente, las láminas

reforzadas en una dirección se usan para unir las entre sí con orientaciones diferentes y obtener un laminado de propiedades deseadas.

En el caso de usar fibras discontinuas, resultará más difícil controlar la orientación de las fibras, por lo que en la mayoría de los casos se supone que la fibra está orientada de forma aleatoria, teniendo el material compuesto propiedades cuasi-isótropas.

2.4 Definición de lámina y laminado.

Se entiende como lámina como el conjunto de una hilera de fibras en un solo plano dentro de una matriz.

El conjunto de láminas superpuestas del mismo material orientadas con las direcciones que se deseen en función de los requerimientos exigidos se denomina laminado.

Los laminados se definen de la siguiente manera (Navarro, Consultado 2016):

- Se definen las láminas desde el exterior al interior del laminado
- Se indica el ángulo que forman las fibras con la dirección de referencia y, mediante un subíndice, el número de láminas seguidas que poseen esa orientación
- Si se define la secuencia de apilamiento de todo el laminado se empleara el subíndice T
- Si se define un laminado simétrico, solo se expresara la secuencia de apilado de uno de los dos lados, se indicara con el subíndice S.

Ejemplo: Un laminado simétrico compuesto por 3 láminas a 90° , 2 a 0° se puede nombrar como $[90_3, 0_2]_S$

2.5 Comportamiento de los materiales compuestos de fibra

La estructura de los materiales compuestos reforzados con fibra es heterogénea y anisótropa. La heterogeneidad implica que las propiedades del material son función de punto y anisotropía implica que además es función de la dirección a la que se refiera. En algunos casos de apilamiento de láminas unidireccionales, se puede producir situaciones particulares de ortotropía (tres planos principales de simetría del material) o incluso de cuasi-isotropía si por ejemplo las láminas se sitúan con diferentes orientaciones relativas (París Caballero, y otros, 2006).

La complejidad de un análisis heterogéneo ha hecho necesario el realizar algunas hipótesis de comportamiento cuyos buenos resultados justifican su mantenimiento. Estas hipótesis están conectadas con una división clásica, aunque tiene aspectos distorsionantes, realizada en la mayoría de libros sobre composites, y que considera el análisis de estos desde dos puntos de vista: micromecánico y macromecánico (París Caballero, y otros, 2006).

- La Micromecánica analiza al material compuesto considerando sus dos componentes: fibra y matriz, aunque no considera la estructura interna de cada uno de ellos. Se busca definir las propiedades de una lámina homogénea (por ejemplo, ortótropa) que se comporta de forma equivalente a la lámina real de material compuesto formada por una cierta distribución de fibras embebidas en una matriz. Para efectuar esta equivalencia es preciso realizar algunas hipótesis adicionales que permitan calcular unas propiedades representativas de la lámina a partir de las propiedades de los componentes y del porcentaje de ellos existente

en el compuesto. Esta lámina homogénea equivalente con unas propiedades representativas del material se utiliza como base para diseñar placas o láminas a las cuales se les aplica las teorías de cálculo estructural.

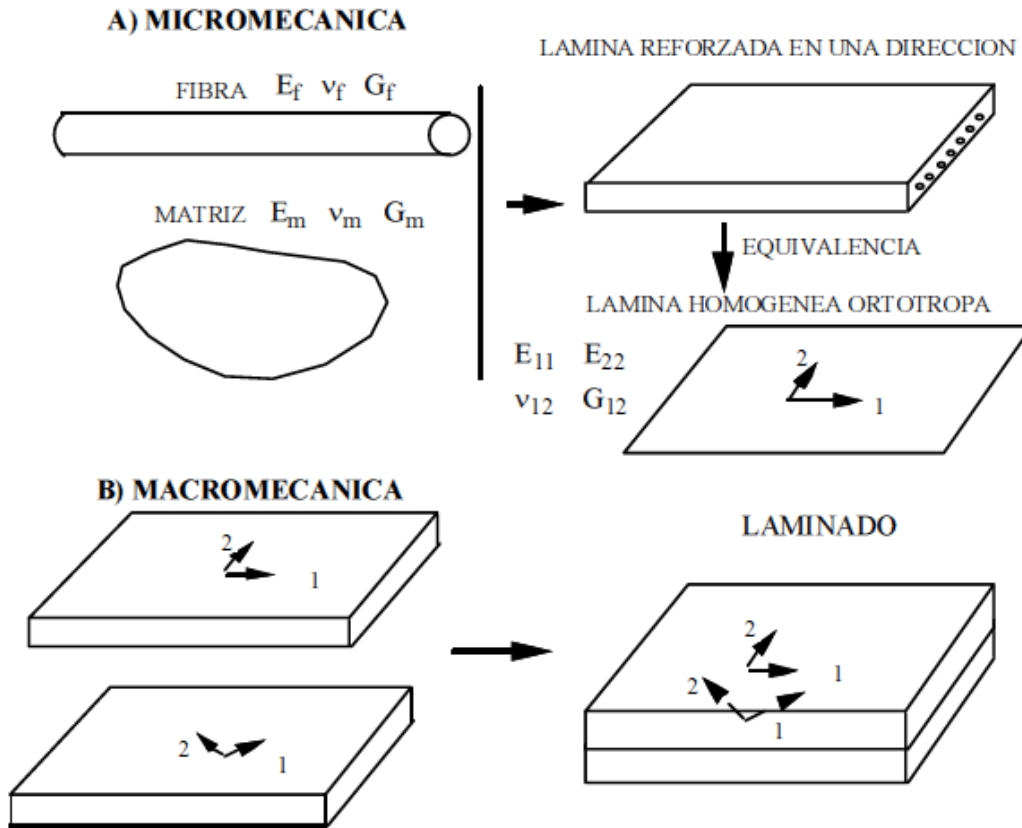


Figura 2.3 Caracterización analítica de Materiales Compuestos (París Caballero, y otros, 2006).

Los materiales compuestos reforzados con fibra son muy superiores a los convencionales en rigidez y resistencia específica. Por consiguiente la comparación entre los materiales convencionales y los compuestos a efectos de propiedades mecánicas está condicionada por el papel que el peso juegue en el diseño de la estructura (París Caballero, y otros, 2006).

El otro aspecto de interés es relativo al fácil control que se puede alcanzar sobre la anisotropía de las propiedades finales. De esta forma pueden disponerse “a medida” los refuerzos de fibra para soportar de forma más óptima posible el estado tensional que se va a producir. Así, en un depósito cilíndrico cerrado sometido a presión interna, la tensión longitudinal es la mitad de la tensión radial, lo que permite una distribución racional de la fibra en las dos direcciones en que se va a reforzar la matriz (París Caballero, y otros, 2006).

2.6 Notación

Se denominan ejes 1,2 a los ejes en los cuales definimos las cargas actuantes, y los ejes naturales del material, los denominamos x e y.

Por otro lado para no arrastrar una notación xy o 12 para el caso de las tensiones de cizalladura, se utiliza la notación completa:

$$T_{ij} = \sigma_{ij} = \sigma_{(9-(i+j))}$$

Quedando por tanto en el plano los subíndices (1, 2, 6) en los ejes de carga y (x,y,s) en los ejes naturales del material. (Castillo López, 2013)

2.7 Obtención de las características mecánicas de una lámina

2.7.1 Hipótesis de partida:

- Las láminas se consideran homogéneas
- Comportamiento elástico del material
- Estado plano de tensiones
- Pequeñas deformaciones
- Adhesión perfecta fibra-matriz
- Adhesión perfecta entre láminas

2.7.2 Estimación de las propiedades del material compuesto mediante Micromecánica

La realización de ensayos no siempre es posible para la caracterización de un material. De esta forma, resulta interesante poder definir una lámina de material compuesto conociendo las propiedades de las componentes matriz y fibra que lo forman.

- Las características de rigidez a definir de la lámina son los módulos elásticos en sus direcciones principales: E_{11}, E_{22} ,
- Las características de rigidez de la fibra: E_f (módulo elástico de la fibra), V_f (fracción volumétrica de la fibra), G_f (módulo de cizalladura de la fibra).
- Las características de rigidez de la matriz: E_m (módulo elástico de la matriz), V_m (fracción volumétrica de la matriz), G_m (módulo de cizalladura de la matriz).

Determinación E11

- Modelo Isodeformación (Paralelo): Esfuerzo en la dirección de la fibra.

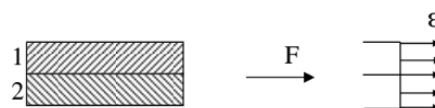


Figura 2.4 Modelo Isodeformación.

La matriz y la fibra presentan la misma deformación.

$$\epsilon_{11} = \epsilon_{11f} = \epsilon_{11m} \quad (2.1)$$

Donde ϵ_{11f} y ϵ_{11m} son la deformación en la dirección 1 de la fibra y de la matriz respectivamente.

Según la ley de comportamiento:

$$\sigma_{11} = E_{11} \cdot \epsilon_{11} \quad (2.2)$$

$$\sigma_{11f} = E_{11f} \cdot \epsilon_{11f} \quad (2.3)$$

$$\sigma_{11m} = E_{11m} \cdot \epsilon_{11m} \quad (2.4)$$

Donde σ_{11f} y σ_{11m} son la tensión en la dirección 1 de la fibra y de la matriz respectivamente.

Aplicando equilibrio:

$$F = A_T \cdot \sigma_{11} = A_f \cdot \sigma_{11f} + A_m \cdot \sigma_{11m} \quad (2.5)$$

Donde F es fuerza y A_T el área total de la sección. A_f y A_m el área de la sección de fibra y matriz respectivamente.

Sustituyendo:

$$A_T \cdot E_{11} \cdot \varepsilon_{11} = A_f \cdot E_{11f} \cdot \varepsilon_{11f} + A_m \cdot E_{11m} \cdot \varepsilon_{11m} \quad (2.6)$$

Reagrupando y multiplicando cada miembro de la ecuación por el espesor:

$$E_{11} = \frac{V_f \cdot E_{11f} + V_m \cdot E_{11m}}{V_T} \quad (2.7)$$

Si se considera al volumen total como la unidad, se obtiene la Ley de Mezclas:

$$E_{11} = V_f \cdot E_{11f} + V_m \cdot E_{11m} \quad (2.8)$$

Donde V_f y V_m son las fracciones volumétricas de la fibra y de la matriz.

Determinación de E22

- Modelo Isotensión (Serie): Esfuerzo en la dirección perpendicular de la fibra.



Figura 2.5 Modelo Isotensión.

La deformación del material es la suma de las deformaciones de los componentes:

$$\varepsilon_{22} = \varepsilon_{22m} + \varepsilon_{22f} \quad (2.9)$$

Donde ε_{22f} y ε_{22m} son la deformación en la dirección 2 de la fibra y de la matriz respectivamente.

La tensión es constante:

$$\sigma_{22} = \sigma_{22m} = \sigma_{22f} \quad (2.10)$$

Donde σ_{11f} y σ_{11m} son la tensión en la dirección 2 de la fibra y de la matriz respectivamente.

Utilizando la ley de comportamiento:

$$\frac{\sigma_{22}}{E_{22}} = \frac{\sigma_{22m}}{E_{22m}} + \frac{\sigma_{22f}}{E_{22f}} \quad (2.11)$$

$$\frac{F \cdot A_T}{E_{22}} = \frac{F \cdot A_m}{E_{22m}} + \frac{F \cdot A_f}{E_{22f}} \quad (2.12)$$

Donde F es fuerza y A_T el área total de la sección. A_f y A_m el área de la sección de fibra y matriz respectivamente.

Reagrupando y multiplicando por el espesor cada miembro:

$$E_{22} = \frac{E_f \cdot E_m}{E_m \cdot V_f + E_f \cdot V_m} \quad (2.13)$$

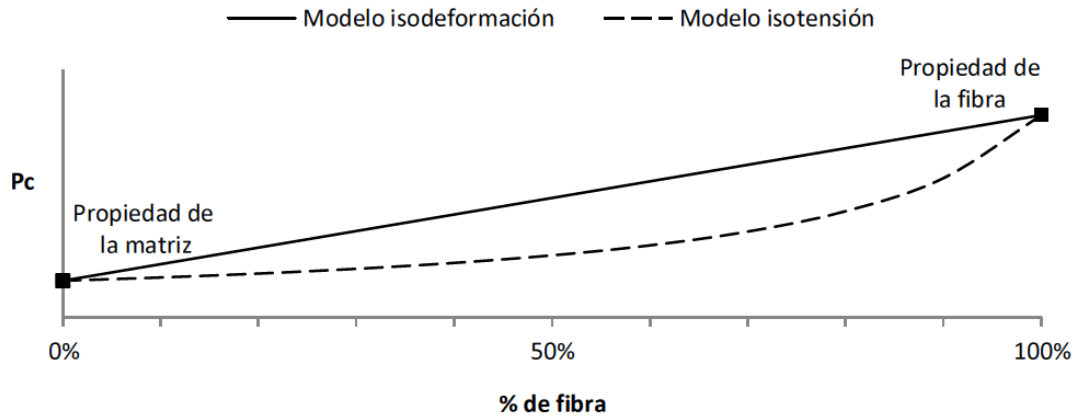


Figura 2.6 Modelos para la consecución de las propiedades de materiales compuestos según sus constituyentes.

2.7.3 Estimación de propiedades fuera del plano

Como se ha podido ver en el apartado anterior, haciendo uso de la Micromecánica pueden obtenerse las propiedades del material compuesto a partir de las propiedades de sus constituyentes.

Los ensayos que habitualmente se realizan para obtener las propiedades de los materiales compuestos son ensayos que obtienen las propiedades de los mismos en el plano de la lámina (E_x , E_y , G_{xy} y ν_{xy}) obviando las propiedades fuera de este (dirección del espesor, eje z) debido a las características físicas que tiene una lámina. Si bien, hay procesos importantes en los materiales compuestos laminados, como puede ser la delaminación, en la que las componentes en la dirección del espesor del laminado adquieren importancia.

Es por ello, que cuando se pretende modelizar este tipo de materiales en software de elementos finitos (por ejemplo Nastran) se requieren las propiedades de la lámina fuera del plano de la misma, algo que no se obtiene normalmente por medio de la realización de ensayos. Es aquí donde aparece la necesidad de realizar una estimación de estas propiedades en esa dirección.

2.7.4 Estimación de propiedades para un laminado unidireccional

Para la estimación de las propiedades fuera del plano de la lámina resulta de mucha utilidad realizar un esquema de la apariencia que tiene un laminado configurado con la lámina a estudiar en los diferentes planos de referencia, con el objeto de poder justificar las propiedades a estimar.

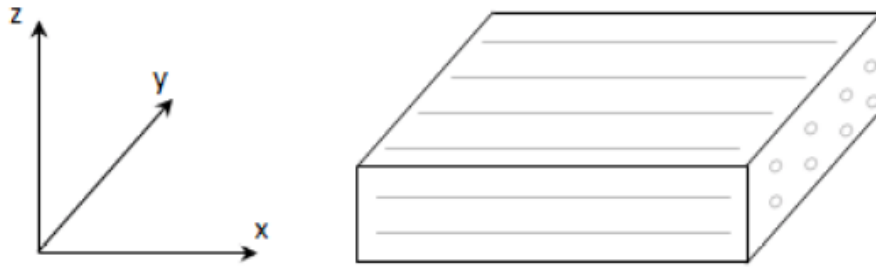


Figura 2.7 Esquema de material compuesto laminado unidireccional.

Para el plano XY, se conocen las propiedades E_x , E_y , G_{xy} y ν_{xy} de la caracterización de la lámina a través de ensayos experimentales de tracción sobre probetas $[0^\circ]$ y $[45^\circ/-45^\circ]$. En la figura 2.8 puede observarse el esquema del laminado en el plano XY donde se conocen las propiedades mencionadas. Comparando este esquema con los de los planos XZ e YZ se podrán estimar las propiedades fuera del plano que es lo que se busca.

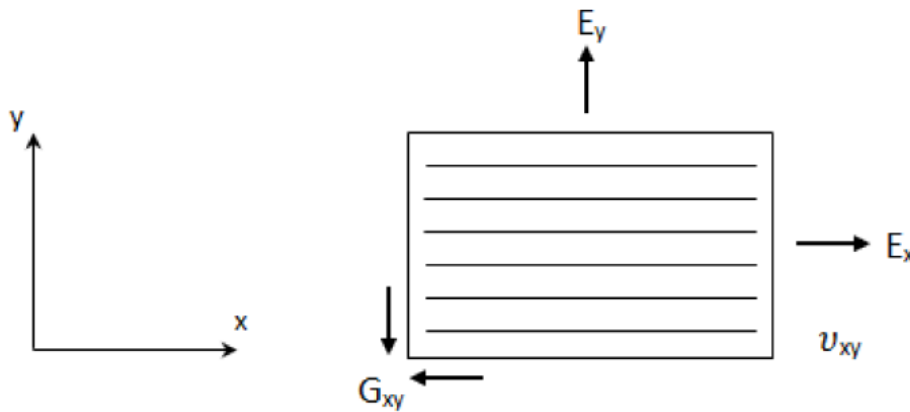


Figura 2.8 Esquema de material compuesto laminado unidireccional en el plano XY.

Para el plano XZ, el esquema es el que se muestra en la figura 2.9. Puede observarse que físicamente es el mismo esquema que se tiene para el plano XY (figura 2.8) por lo que se puede deducir que E_z es aproximable a E_y lo mismo que G_{xz} se puede aproximar a G_{xy} y ν_{xz} a ν_{xy} .

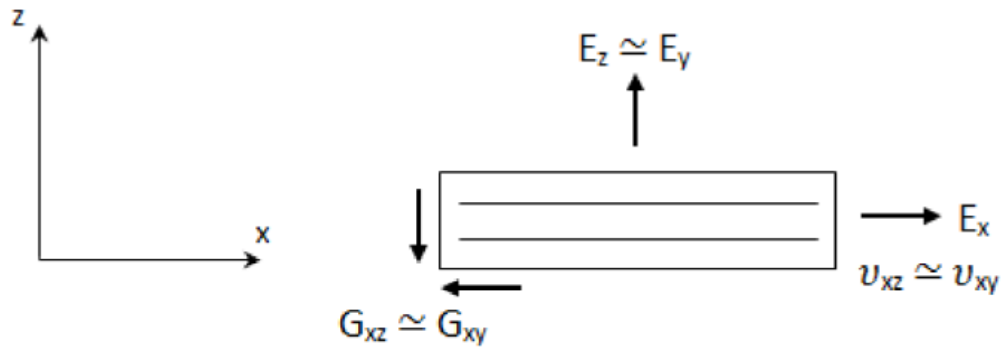


Figura 2.9 Esquema de material compuesto laminado unidireccionalmente en el plano XZ.

En este punto quedarían por definir G_{yz} y ν_{yz} . Observando la figura 2.10, puede deducirse que los valores de estas propiedades van a ser muy similares a los de la matriz que constituye la lámina. Aún así, para obtener un valor más justificado puede usarse la expresión en isotensión de la Micromecánica para obtener los valores en cuestión.

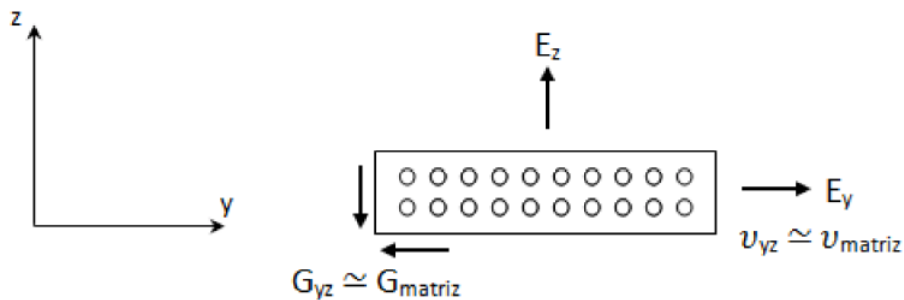


Figura 2.10 Esquema de material compuesto laminado unidireccional en el plano YZ.

2.7.5 Estimación de propiedades para un tejido

Para obtener las propiedades fuera del plano de un material compuesto laminado en el que los refuerzos de lámina están aplicados en forma de tejido uniforme se procede de una forma similar a la que se ha llevado a cabo para el laminado unidireccional.

El esquema del laminado es el que se muestra en la figura 2.11.

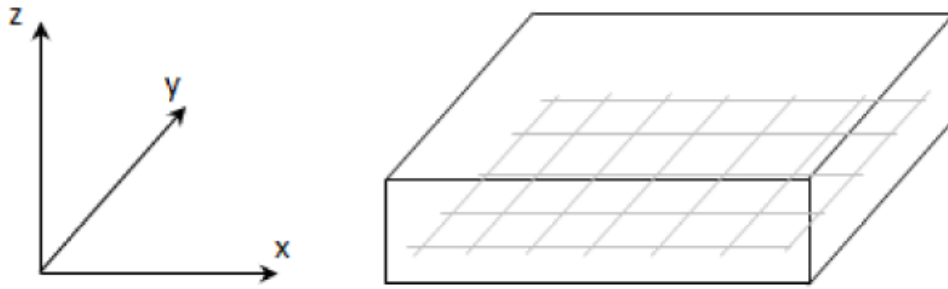


Figura 2.11 Esquema de material compuesto laminado con refuerzo tejido.

En este tipo de laminados, los módulos de elasticidad en el plano XY son iguales y conocidos por medio de caracterización del material a través de ensayos experimentales. También serán conocidos G_{xy} , ν_{xy} .

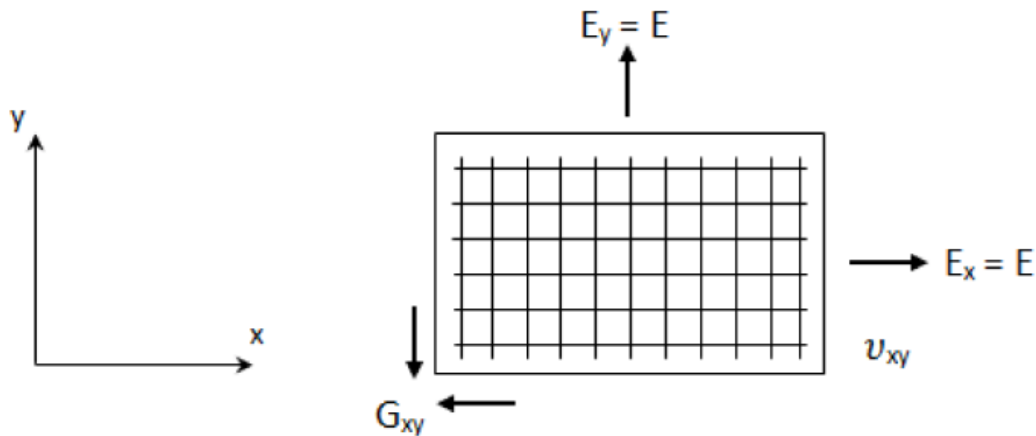


Figura 2.12 Esquema de material compuesto laminado con refuerzo de tejido en el plano XY.

Para el plano XZ e YZ, se tiene una configuración que es similar a la que se tendría en un laminado unidireccional, como puede observarse en la figura 2.13. En estos casos, se puede considerar el módulo de elasticidad en la dirección del espesor (E_z) similar al de la matriz del material compuesto. En cuanto al módulo transversal de elasticidad (G) se observa que $G_{xz} \approx G_{yz}$. Éste puede obtenerse por medio de Micromecánica, suponiendo un laminado unidireccional o asumiendo que es muy similar al de la matriz, que va a ser el resultado que aporte el análisis micromecánico. De la misma forma puede procederse para los coeficientes de Poisson.

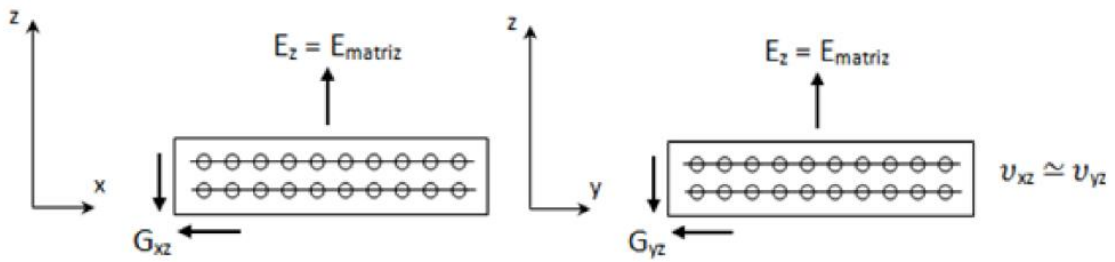


Figura 2.13 Esquema de material compuesto laminado con refuerzo de tejido en el plano XZ e YZ.

Ver Capítulo 4. Caracterización Mecánica de las pieles.

2.8 Tipos de refuerzo de tejido

Existen dos tipologías principales de refuerzo de tejido en función de la forma en la que los hilos se encuentran entrelazados.

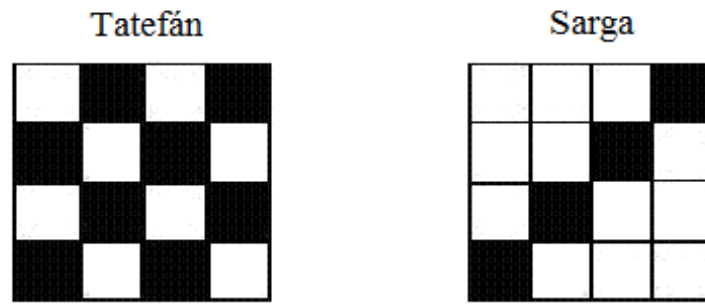


Figura 2.14 Tejido Tafetán y Sarga

El tejido Sarga está formado por hilos de fibra entrelazados entre si creando ángulos de 45°, dando lugar a un elevado número de cruces que “dificultan” la absorción de resina por lo que conlleva una mayor impregnación de la misma, aunque gracias a ese elevado número de cruces hace muy difícil que las fibras se separen de su posición normal evitando así concentraciones localizadas de resina.

Por otra parte, el tejido Tafetán, que es el que tradicionalmente se utiliza para la fabricación y reparación de tablas de surf, está formado por hilos de fibra tejidos entre si creando ángulos de 90°, de tal manera que su menor número de cruces lo convierte en un tejido, excelente para la impregnación de la resina, con poca absorción de la misma, mejorando así el contenido en fibra y la resistencia del laminado; así como su adaptabilidad, aunque hay que tener cuidado a la hora de manipularla, ya que si las fibras se separan de su posición normal, pueden crear concentraciones localizadas de resina.

3 Espumas poliméricas

3.1 Introducción

Las espumas poliméricas son materiales celulares. Este tipo de materiales permiten la optimización de la rigidez, o de resistencia, o de la absorción de energía, para un peso dado de material. Las espumas permiten hacer sólidos muy ligeros y si se combinan con pieles rígidas para hacer un sándwich, dan estructuras que son excepcionalmente rígidas y ligeras.

A menudo este tipo de materiales son utilizados como elementos de protección pasiva, porque tienen una gran capacidad para absorber energía. La industria del automóvil utiliza cada vez más este tipo de materiales como soluciones estructurales para la absorción de energía en caso de impacto. Por este motivo el estudio de la influencia de la velocidad de deformación sobre el comportamiento del material es cada vez más importante

3.2 Proceso de fabricación

Para comprender el comportamiento mecánico de las espumas poliméricas es necesario conocer la estructura interna de las mismas. Esta estructura depende del proceso de fabricación del material.

La mayoría de los polímeros se pueden espumar fácilmente, por simple agitación mecánica o por soplado de un gas a presión en el polímero fundido. Pero el método más útil, con diferencia, consisten en mezclar un agente químico espumante con los granulados de polímero antes de procesarlo: durante el ciclo de calentamiento se libera CO_2 que genera burbujas de gas en el procesado final de moldeo. Agentes similares se pueden mezclar con los termoestables de forma que se libere el gas durante el proceso de curado, expandiendo el polímero en una espuma; si se realiza en un molde cerrado la espuma reproduce exactamente la forma de este y genera una superficie suave y densa (F. Ashby, y otros, 1998)

3.3 Comportamiento mecánico (F. Ashby, y otros, 1998)

Las propiedades de una espuma vienen determinadas por las propiedades del polímero y por la densidad relativa (ρ/ρ_s); la densidad de la espuma (ρ) dividida por la del sólido sin espumar (ρ_s). La densidad relativa desempeña el papel de la fracción en volumen de las fibras en un material compuesto, y todas las ecuaciones para las propiedades de la espuma contienen el término ρ/ρ_s . La densidad relativa puede variar ampliamente, desde 0,5 para una espuma densa hasta 0,005 para muy ligera.

Las celdas de las espumas son poliédricas, como los granos cristalinos de un metal. Las paredes de las celdas, que es donde se concentra el sólido, pueden ser abiertas (como una esponja) o cerradas (como una espuma de flotación), y pueden ser equiaxiales o alargadas.

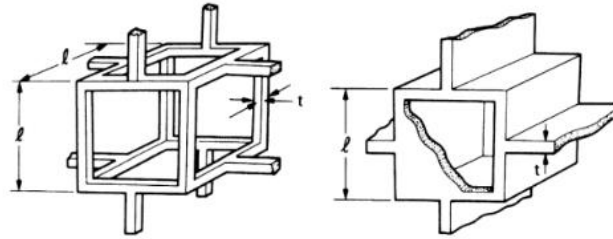


Figura 2.15 Espumas poliméricas, mostrando las celdas poliédricas. Algunas espumas tienen celdas cerradas y otras celdas abiertas (F. Ashby, y otros, 1998).

Cuando se comprime una espuma, la curva tensión-deformación presenta tres regiones. A pequeñas deformaciones, la espuma se deforma de manera elástica lineal, después hay una meseta de tensión casi constante con la deformación y finalmente hay una región de densificación cuando las membranas celulares se aglomeran juntas.

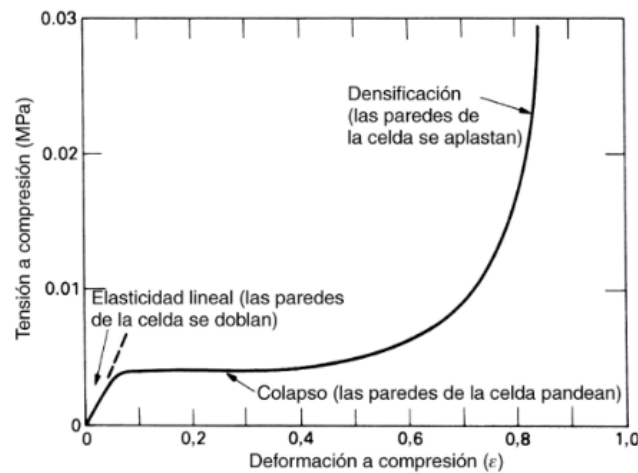


Figura 2.16 Curva tensión-deformación a compresión para espuma polimérica. Pueden producirse grandes deformaciones a compresión, ya que la espuma absorbe gran cantidad de energía cuando es aplastada (F. Ashby, y otros, 1998).

- **Zona elástico lineal.** A bajas deformaciones las paredes de las celdas se doblan, como pequeñas vigas empotradas por ambos extremos. La deflexión se puede calcular utilizando teoría de vigas, obteniendo la rigidez de una celda, y por tanto el módulo E de la espuma en función de la longitud l y el espesor t de las paredes. Se pueden relacionar estos parámetros con la densidad relativa, y de esta forma expresar el módulo elástico de la espuma como:

$$E = E_s \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^2. \quad (2.14)$$

Donde: E es el módulo elástico de la espuma, E_s el módulo elástico de la espuma sin espumar, ρ la densidad de la espuma y ρ_s la densidad de la espuma sin espumar.

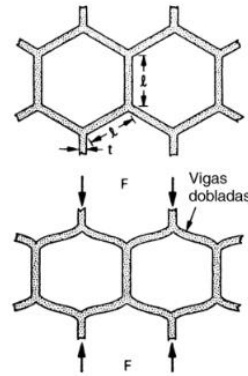


Figura 2.17 La flexión de las paredes de las celdas proporciona la parte elástica lineal de la curva tensión-deformación (F. Ashby, y otros, 1998).

- **Zona elástica no lineal, meseta.** La zona elástico lineal está limitada a unas deformaciones alrededor del 5%, pero la espuma se puede comprimir mucho más que eso. A partir de la zona elástico lineal la deformación es recuperable, pero no lineal, dando lugar a la meseta. Esta está originada por el fallo de las paredes la celda. Este fallo puede tener dos orígenes:
 - Fallo por pandeo de las paredes de la celda. Usando la teoría de vigas, se puede calcular la tensión de colapso como:

$$\sigma_{cl}^* = 0.05E_s \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^2. \quad (2.15)$$

Donde: σ_{cl}^* es el módulo elástico de la espuma, E_s el módulo elástico de la espuma sin espumar, ρ la densidad de la espuma y ρ_s la densidad de la espuma sin espumar.

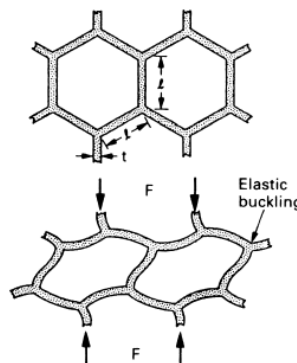


Figura 2.18 Fallo por pandeo de las paredes de la celda, dando lugar a la zona de meseta (F. Ashby, y otros, 1998).

- Fallo plástico. Si el material de la pared es plástico (y muchos polímeros lo son), entonces la espuma en su conjunto se comporta plásticamente. La curva tensión-deformación se sigue pareciendo, pero ahora la meseta esta causa por el colapso plástico. El colapso plástico ocurre cuando el momento ejercido en las paredes celulares excede su momento plástico resistente, creando bisagras plásticas. La tensión de colapso de la espuma se relaciona con el limite elástico de la pared:

$$\sigma_{pl}^* = 0,3 \sigma_y \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^{3/2}. \quad (2.16)$$

Donde: σ_{pl}^* tensión de colapso plástico, σ_y límite elástico de la pared, ρ la densidad de la espuma y ρ_s la densidad de la espuma sin espumar.

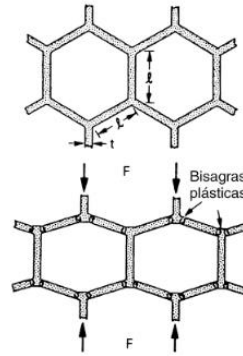


Figura 2.19 Fallo plástico de las paredes de la celda (F. Ashby, y otros, 1998).

Las espumas plásticas son buenas para embalajes que permiten absorber la energía de un solo impacto: parachoques de poliuretano, espuma de poliestireno para proteger un televisor.

3.4 Influencia de la velocidad de deformación, estructura interna y densidad.

El comportamiento mecánico descrito anteriormente corresponde con una respuesta del material a un proceso de compresión cuasiestático. La espuma polimérica modifica su comportamiento en función de la velocidad de deformación. En líneas generales la espuma aumenta su rigidez a altas velocidades de deformación porque el gas existente en el interior de las celdas no tiene tiempo suficiente para salir, lo que se traduce en un aumento de la presión de la celda y un aumento del módulo volumétrico.

El artículo *Polypropylene foam behaviour under dynamic loading: Strain rate, density and microstructure effects* de Remy Bouix, Philippe Viot, Jean-Luc Lataillade, publicado 15 mayo 2008 (Bouix, y otros, 2008) estudia la influencia de la densidad, de la estructura interna de la espuma y de la velocidad de deformación.

Influencia de la estructura interna:

Para espumas con la misma densidad, se demuestra que:

- Espumas de celda grande se muestran más sensibles a la velocidad de deformación, porque dicha sensibilidad está ligada con la micro-inercia de las celdas. Estas espumas muestran un aumento más acentuado de su rigidez con en el aumento de la velocidad de deformación que espumas de celda pequeña.
- Espumas de celda grande muestran una menor resistencia en procesos estáticos que espumas de celda pequeña, porque los fenómenos de flexión y pandeo son más acentuados.

Densidad

La tensión de colapso aumenta de forma lineal con la densidad para bajas densidades, ya sea en procesos cuasiestáticos o dinámicos. Pero para altas densidades (superiores a 87 kg/m³) y cargas dinámicas la variación de la tensión de colapso es menos significativa.

El módulo de elasticidad de la meseta se ve muy afectado por la variación de densidad para altas densidades.

Velocidad de deformación

Las espumas poliméricas se comportan de forma distinta en función de la velocidad de deformación a la que estén sometidas. Este cambio de comportamiento se refleja en una variación de la tensión de colapso y del módulo elástico de la meseta. Este fenómeno está relacionado con el comportamiento viscoelástico de las paredes de celdas del material y del gas atrapado en su interior.

La mayor o menos sensibilidad de la espuma a la velocidad de deformación está muy marcada por la densidad de la misma.

Las espumas más densas son más sensibles a la velocidad de deformación, se observa un incremento mayor de la tensión de colapso y del módulo elástico de la meseta en espumas más densas cuando éstas se someten a velocidades de deformación mayores.

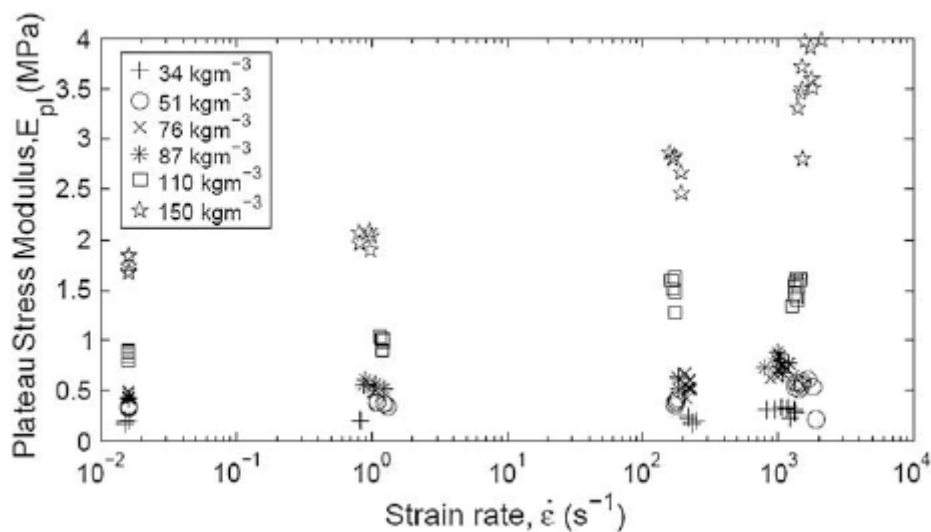


Figura 2.20 Módulo elástico de la meseta para diferentes densidades de espuma en función de la velocidad de deformación (Bouix, y otros, 2008).

Las espumas más densas se ven más afectadas porque la sensibilidad a la velocidad de deformación está ligada a fenómenos de micro inercia, que están más presentes en celdas de pared gruesa.

En las pruebas elásticas el gas escapa de las celdas con total facilidad y en pruebas dinámicas no le da tiempo a escapar y aumenta la presión en el interior de la celda.

Capítulo 3 Pala Marvel

1 Introducción.

Este capítulo trata sobre la pala Marvel de la empresa Shark pádel, que es objeto de estudio de este TFG. En él se realiza una descripción geométrica de la pala y de los materiales que la forman, así como una breve descripción del proceso de fabricación de la misma.

2 Descripción geométrica

Las principales características geométricas de la pala de pádel Marvel se recogen en la figura 3.1. Se puede considerar que presenta una forma redonda, lo que hace que tenga un balance bajo y un gran control sobre el golpe.

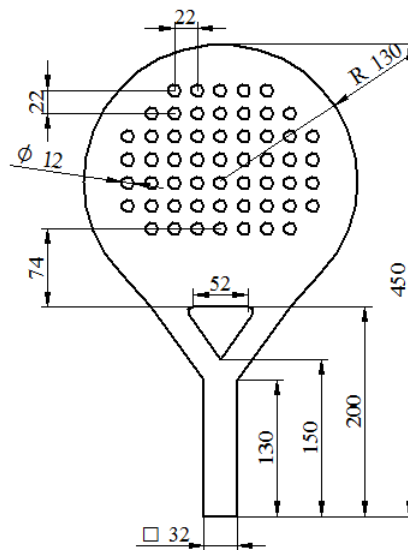


Figura 3.1 Geometría pala de pádel Marvel.

La pala está formada por un núcleo de espuma polimérica situada entre dos pieles formadas por tres capas cada una de tejido de fibra de vidrio, de esta forma se crea una disposición de los materiales tipo sandwich como puede observarse en la figura 3.2

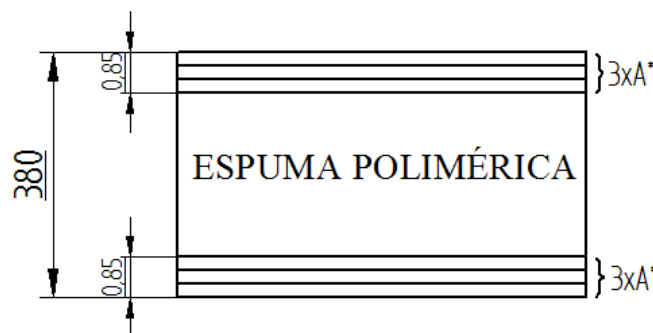


Figura 3.2 Distribución de material en el espesor de la pala.

A*: Tejido de fibra de vidrio Sarga 2×2 200 g/m² 3 K

3 Materiales empleados

- **Espuma de polietileno**

Tabla 3-1 Propiedades espuma de polietileno.

Propiedades	Norma	Unidades	Media	Máximo	Mínimo
Espesor	ISO-1923	mm	40,00	37,60	42,40
Densidad aparente	ISO-845	kg/m ³	28,00	25,2	30,8
Resistencia a tracción	ISO-1926	kPa	320	240	400
Máximo alargamiento	ISO-1926	%	260	180	340
Tensión de compresión	ISO-3386-1	kPa			
Deformación 25%			36	25	47
Deformación 40%			70	49	91
Deformación 50%			100	70	130

Para más información, ver ficha técnica de la espuma en anexo D

- **Resina Resoltech 1020 con endurecedor 1023S**

Tabla 3-2 Propiedades de la matriz.

Proporciones de la mezcla (en volumen)	100 (resina) / 35 (endurecedor)
Densidad mezcla (ISO 1675, ± 0.5)	1060 kg/m ³
Viscosidad mezcla (ISO 120582, $\pm 15\%$)	340 mPa·s a 23°C
Aspecto resina 1020	Líquido amarillo transparente
Aspecto endurecedor 1023S	Líquido amarillo transparente
Aspecto mezcla	Líquido opalescente
Módulo elástico mezcla	2.6 GPa
Tensión de rotura mezcla	76.2 MPa

Para más información, ver ficha técnica de la espuma en anexo D

- **Tejido de fibra de vidrio sarga 2 × 2 g/m² 3k.** Densidad 1100 kg/m³
- **Preforma de la pared.** Malla de carbono/vidrio tubular de 40 mm y 39,80 g/m lineal para Palas de pádel.



Figura 3.3 Preforma de la pared.

Para más información, ver ficha técnica de la espuma en anexo D

4 Proceso de fabricación

4.1 Preparación de las capas de fibra y corte de la espuma.

Se corta el tejido de fibra de vidrio con la forma de la cara superior de la espuma (figura 3.4), que previamente se ha cortado con la forma del molde.

Caracterización y simulación del comportamiento ante impacto de estructuras compuestas tipo sándwich. Propuesta metodológica para un caso real: Pala de Pádel.



Figura 3.4 Corte del tejido de fibra para cara de golpeo..



Figura 3.5 Corte de tejido de fibra de carbono para puente. y empuñadura.



Figura 3.6 Distribución de las piezas de fibra sobre el molde.



Figura 3.7 Preforma de fibra de carbono para formar el marco.

4.2 Mezcla endurecedor-resina.

Se realiza la mezcla endurecedor resina en las proporciones indicadas en la ficha técnica. Ver apartado 2 de este capítulo.

4.3 Impregnación del molde con desmoldeante: cera.

Antes de proceder al moldeo a mano es necesario aplicar un desmoldeante para facilitar el proceso de desmoldeo.

4.4 Colocación de tres capas de fibra de vidrio sobre la base del molde.

Con la ayuda de una brocha se impregna el molde con la mezcla resina-endurecedor. Se coloca una capa de tejido de fibra de vidrio, intentando no dejar pliegues, bolsas de aire y otro tipo de imperfecciones, para tal fin se puede utilizar un rodillo. Se repite el proceso hasta que se colocan tres capas de fibra.



Figura 3.8 Impregnación con resina de las capas de fibra de vidrio.

4.5 Colocación de fibra de carbono en la zona del puente.



Figura 3.9 Colocación de fibra de carbono en la zona del puente.

4.6 Preparación de la preforma de fibra de carbono y colocación del misma.



Figura 3.10 Impregnación con resina de la preforma de fibra de carbno.



Figura 3.11 Colocación de la preforma de fibra de carbono para formar el marco de la pala.

4.7 Mismo procedimiento con la otra mitad del molde. Cierre del molde.



Figura 3.12 Cierre del molde.

4.8 Se introduce el molde en una caja para darle consistencia al conjunto



Figura 3.13 Molde dentro de caja.



Figura 3.14 Cierre de la caja con molde en su interior.

Se conecta un compresor al extremo del tubo de plástico que se encuentra en el interior de la preforma de fibra de carbono tubular que da forma al borde. La presión en el interior del tubular durante el proceso de curado hace que este mantenga la forma cuando el proceso de endurecimiento termina.



Figura 3.15 Tubos de plástico para el llenado de aire de la preforma del marco.

Se introduce la caja con el molde, conectados al compresor, en un horno o zona acondicionada entorno a los 40°C para acelerar el proceso de curado. Este proceso dura varias horas. Finalmente se procede al desmolde de la pala.

El acabado final de la pala incluye la colocación de una cinta entorno al mango, un tapón de cierre y un proceso de pintura y lacado.

Después del proceso de lacado se procede a realizar los taladros sobre la pala de pádel.



Figura 3.16 Pala Marvel, sin pintar y sin taladros a la izquierda. Pala Marvel terminada a la derecha.

Capítulo 4 Caracterización mecánica de las pieles.

1 Introducción.

Este capítulo trata sobre la caracterización mecánica de las pieles de la pala de pádel. Se han estudiado dos laminados distintos, uno formado por tres capas de tejido de fibra de vidrio y otro formado por tres capas de tejido de fibra de carbono. Para su caracterización se han realizado ensayos de tracción y cizalladura.

Al final de este capítulo se realiza una estimación de las propiedades de los laminados estudiados a partir del porcentaje de fibra en volumen del material. Se han realizado un ensayo de quemado y otro de digestión para determinar los porcentajes de fibra de vidrio y carbono respectivamente.

2 Fabricación de las probetas.

Las probetas se han obtenido de dos placas de $0,5 \times 0,5$ m de espesor mayor a 1,5 mm, formadas por 6 láminas de tejido de fibra de vidrio y fibra de carbono respectivamente, creando un laminado $[45/-45]_{3S}$

2.1 Materiales empleados:

- Tejido de fibra de vidrio sarga 2×2 200 g/m²
- Tejido de fibra de carbono sarga 2×2 200 g/m²
- Resina Resoltech 1020 con endurecedor 1023S

Tabla 4-1 Propiedades de la matriz.

Proporciones de la mezcla (en volumen)	100 (resina) / 35 (endurecedor)
Densidad mezcla (ISO 1675, ± 0.5)	1060 kg/m ³
Viscosidad mezcla (ISO 120582, $\pm 15\%$)	340 mPa.s a 23°C
Aspecto resina 1020	Líquido amarillo transparente
Aspecto endurecedor 1023S	Líquido amarillo transparente
Aspecto mezcla	Líquido opalescente
Módulo elástico mezcla	2.6 GPa
Tensión de rotura mezcla	76.2 MPa

Datos obtenidos de las fichas técnicas correspondientes. Ver anexo D

2.2 Proceso de fabricación:

Las placas han sido fabricadas por moldeo por contacto.

Posteriormente se han mecanizado las probetas sujetas a ensayo a partir de dichas placas.

3 Determinación de los porcentajes de fibra en volumen.

3.1 Quemado. Determinación del porcentaje de fibra de vidrio en volumen.

3.1.1 Objetivos

Determinación del porcentaje en volumen de fibra de vidrio existente en el material compuesto para la estimación de sus propiedades mecánicas mediante la aplicación de Micromecánica. Ver Capítulo 2 Materiales Empleados.

3.1.2 Fundamento y norma

El ensayo se basa en la pérdida por ignición de la matriz de resina del material. Si es fibra de vidrio o filamento lo que se utiliza como refuerzo de una resina orgánica, se descomponen completamente los materiales volátiles bajo las condiciones de este ensayo y la pequeña cantidad de compuestos volátiles que pueden estar presentes (agua, disolvente residual) se ignora, la pérdida de ignición puede ser considerada como el contenido de resina de nuestra muestra.

Este ensayo no es aplicable para muestras que contienen material de refuerzo que pierde peso durante el proceso de quemado. Tampoco es aplicable en muestras cuya resina contiene rellenos que no se descomponen durante la ignición.

La norma que rige este método de ensayo es la ASTM D2584-08.

3.1.3 Elementos necesarios

- Horno de mufla capaz de mantener una temperatura de $565 \pm 28^\circ\text{C}$
- Crisoles de platino o cerámica de unos 30 ml de capacidad aproximadamente.
- Tres muestras, como mínimo, de aproximadamente 5g cada una.
- Balanza con una precisión de una milésima de gramo.

3.1.4 Procedimiento

- Calentar un crisol entre 500 y 600°C durante 10 minutos.
- Pesarse el crisol con una precisión de al menos una milésima de gramo.
- Colocar la muestra en el crisol y pesarse el conjunto.
- Calentar el crisol con la muestra en un horno mufla a unos $565 \pm 28^\circ\text{C}$ hasta que hayan desaparecido los residuos. Dejar enfriar a temperatura ambiente y volver a pesarse el conjunto crisol-muestra.



Figura 4.1 Crisoles con muestra.

El ensayo se ha realizado con tres muestras.

3.1.5 Tratamiento de datos

$$Peso_{muestra} = (Crisol + muestra) - Crisol \quad (4.1)$$

$$Peso_{fibra} = (Crisol + muestra_{quemada}) - Crisol \quad (4.2)$$

$$\%Peso_{fibra} = \frac{Peso_{fibra}}{Peso_{muestra}} \times 100 \quad (4.3)$$

$$\rho_{composite} = \frac{100}{\frac{Peso_{fibra}}{\rho_{fibra}} + \frac{100 - \%Peso_{fibra}}{\rho_{resina}}} \quad (4.4)$$

$$\%fibra = 100 \times \frac{Peso_{fibra} \cdot \left(\frac{\rho_{resina}}{100}\right)}{\rho_{fibra} - \left(\% \frac{Peso_{fibra}}{100}\right) \cdot (\rho_{fibra} - \rho_{resina})} \quad (4.5)$$

3.1.6 Resultados

Tabla 4-2 Ensayo de quemado.

	Muestra 1 A	Muestra 2 B	Muestra 3 C	Medias
Crisol (g)	39,7308	41,1089	47,0534	
Crisol + muestra (g)	44,9417	46,2658	52,0034	
Crisol + muestra quemada (g)	42,0428	43,3817	49,2452	
Peso muestra	5,2109	5,1569	4,95	
Peso fibra	2,312	2,2728	2,1918	
% Peso de fibra	44,4	44,1	44,3	44,2 ± 0,2
Densidad vidrio (kg/m ³)	2530	2530	2530	
Densidad resina (kg/m ³)	1060	1060	1060	
Densidad laminado (kg/m ³)	1428,17	1424,88	1427,17	1426 ± 2
% fibra en volumen	25,0	24,8	25,0	24,9 ± 0,1

Se ha obtenido un porcentaje en volumen de fibra de vidrio del 24,9% con una desviación típica de ± 0,1.

3.2 Digestión. Determinación del porcentaje de fibra de carbono.

3.2.1 Objetivos

Determinación del porcentaje en volumen de fibra de carbono existente en el material compuesto para la estimación de sus propiedades mecánicas mediante la aplicación de Micromecánica. Ver Capítulo 2 Materiales Empleados.

3.2.2 Fundamento y norma

El ensayo se basa en la pérdida por digestión de la matriz de resina del material. La cantidad de material que se pierde durante el proceso se considerada como el contenido de resina de nuestra muestra.

La norma que rige este método de ensayo es la ASTM D 3171-99.

3.2.3 Elementos necesarios

- Balanza de microprecisión con tolerancia 0,0001 g.
- Filtro papel.
- Tres recipientes Erlenmeyer y tres vidrios de reloj.
- Baño termostático con capacidad de $75\pm 1^{\circ}\text{C}$
- Ácido nítrico.
- Acetona.
- Horno con capacidad para temperatura de $100 \pm 3^{\circ}\text{C}$
- Un desecador.
- Útiles de seguridad (guantes, mascarilla, gafas...).
- Campana extractora.

3.2.4 Procedimiento

- Pesarse cada filtro de papel en la balanza de microprecisión.
- Pesarse el filtro más la muestra en la balanza de microprecisión.
- Colocar los tres Erlenmeyer en el baño termostático.
- Añadir ácido nítrico concentrado al 70% a los Erlenmeyer hasta cubrir la muestra.
- Añadir una muestra en cada Erlenmeyer y poner el baño a 75°C .
- Poner los vidrios de reloj a los Erlenmeyer
- Dejarlo durante mínimamente cinco horas en la campana extractora.
- Tras las cinco horas expulsar el contenido de ácido nítrico a un recipiente haciéndolo pasar por el filtro papel.
- Limpiar con acetona los restos de fibra que quedan en el Erlenmeyer pasándolo sobre el mismo filtro papel y expulsando la acetona a otro recipiente
- Introducir los filtros con las fibras en el horno a 100°C durante una hora.
- Tras la hora, se introducen los filtros con las fibras en el desecador hasta que llegue a temperatura ambiente
- Pesarse el filtro con las fibras en la balanza de microprecisión.

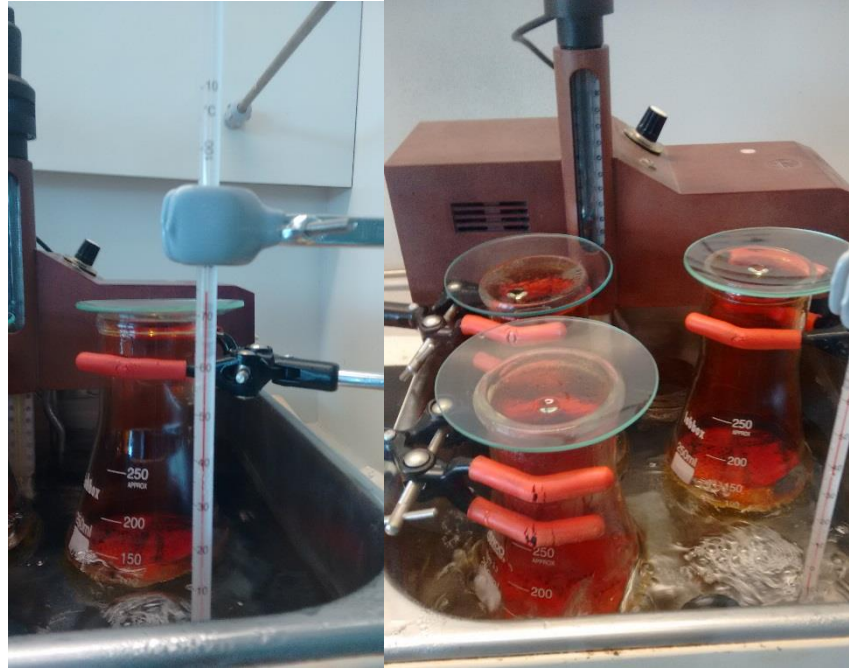


Figura 4.2 Erlenmeyer en baño termostático y control de la temperatura.

Consideraciones

- Se recomienda incrementar de forma considerable el tiempo de digestión si no se posee del ácido nítrico en la concentración adecuada. En este caso, se realizaron 10 horas de digestión, con ácido nítrico en concentrado al 65%.
- Se recomienda incrementar el tiempo de secado en el horno, para eliminar completamente cualquier residuo que pueda quedar en la muestra. En este caso, la muestra permaneció en el horno más de 24 horas.
-



Figura 4.3 Fibras de carbono después del proceso de digestión.

3.2.5 Tratamiento de datos

$$Peso_{muestra} = (Papel + muestra) - Papel \quad (4.6)$$

$$Peso_{fibra} = (Papel + muestra_{quemada}) - Papel \quad (4.7)$$

$$\%Peso_{fibra} = \frac{Peso_{fibra}}{Peso_{muestra}} \times 100 \quad (4.8)$$

$$\rho_{composite} = \frac{100}{\frac{Peso_{fibra}}{\rho_{fibra}} + \frac{100 - \%Peso_{fibra}}{\rho_{resina}}} \quad (4.9)$$

$$\%fibra = 100 \times \frac{Peso_{fibra} \cdot \left(\frac{\rho_{resina}}{100}\right)}{\rho_{fibra} - \left(\% \frac{Peso_{fibra}}{100}\right) \cdot (\rho_{fibra} - \rho_{resina})} \quad (4.10)$$

3.2.6 Resultados

Tabla 4-3 Ensayo de digestión.

	Muestra 1 A	Muestra 2 B	Muestra 3 C	Medias
Papel (g)	1,6524	2,5780	1,7634	
Papel + muestra (g)	5,7257	6,9740	5,8231	
Papel + muestra quemado (g)	3,3685	4,4015	3,3916	
Peso muestra (g)	4,0733	4,3960	4,0597	
Peso fibra (g)	1,7161	1,8235	1,6282	
% Peso de fibra	42,1	41,5	40,1	41 ± 1
Densidad carbono (kg/m ³)	1770	1770	1770	
Densidad resina (kg/m ³)	1060	1060	1060	
Densidad laminado (kg/m ³)	1275,57	1271,58	1263,23	1270 ± 6
% fibra en volumen	30,4	29,8	28,6	29 ± 1

Se ha obtenido un porcentaje en volumen de fibra de carbono del 29% con una desviación típica de ± 1%.

4 Ensayo de tracción

4.1 Objetivo

El ensayo de tracción tiene como objetivo obtener:

- Resistencia a la tracción (X).
- Módulo de elasticidad (E_x).
- Coeficiente de Poisson (ν_{xy}).

4.2 Fundamento y norma

- La resistencia a tracción X se obtiene directamente del ensayo. Es el valor máximo de tensión registrado en el ensayo.
- El módulo de elasticidad E_x se obtiene mediante la Ley de Hooke y los valores de las deformaciones exilon ϵ_x que se calculan a partir del desplazamiento que se produzca en el ensayo. E_x es la pendiente de la gráfica deformación-tensión, donde σ_x es la tensión.

$$\sigma_x = E_x \cdot \epsilon_x \quad (4.11)$$

- El coeficiente de Poisson ν_{xy} se obtiene como cociente de la deformación ϵ_{yy} y ϵ_{xx}

$$\nu_{xy} = -\frac{\epsilon_{yy}}{\epsilon_{xx}} \quad (4.12)$$

Todo el ensayo está basado en la norma ASTM D 3039-76.

4.3 Probeta

Las probetas utilizadas durante el ensayo no cumplen la norma ASTM D 3039-76, porque estas son relativamente más complejas de mecanizar que las probetas empleadas.

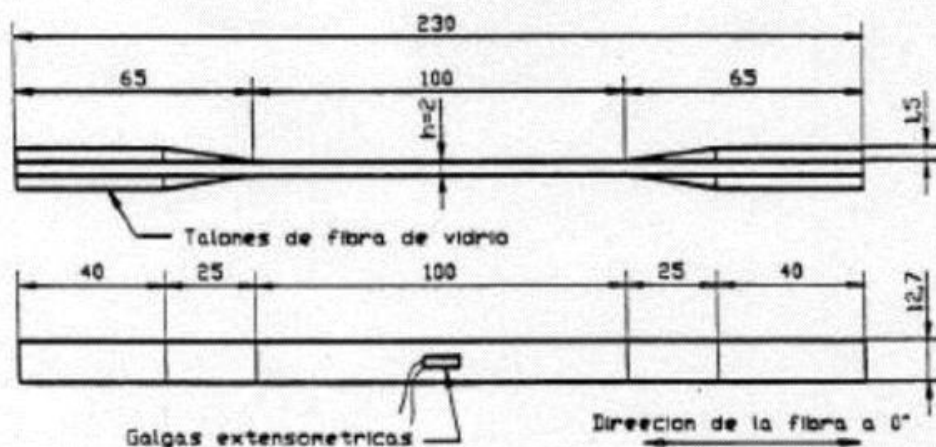


Figura 4.4 Probeta ensayo de tracción normalizada.

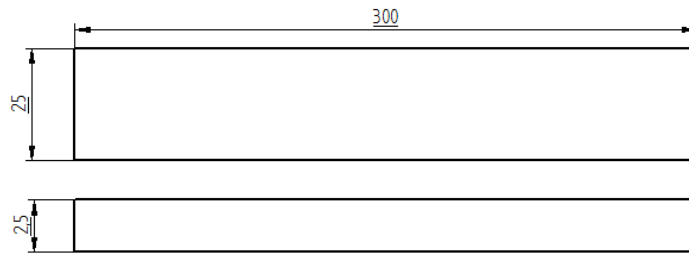


Figura 4.5 Probetas ensayos de tracción utilizadas en valores nominales.

4.4 Maquinaria y software

La máquina de ensayos utilizada es la Servosis ME-405/10.

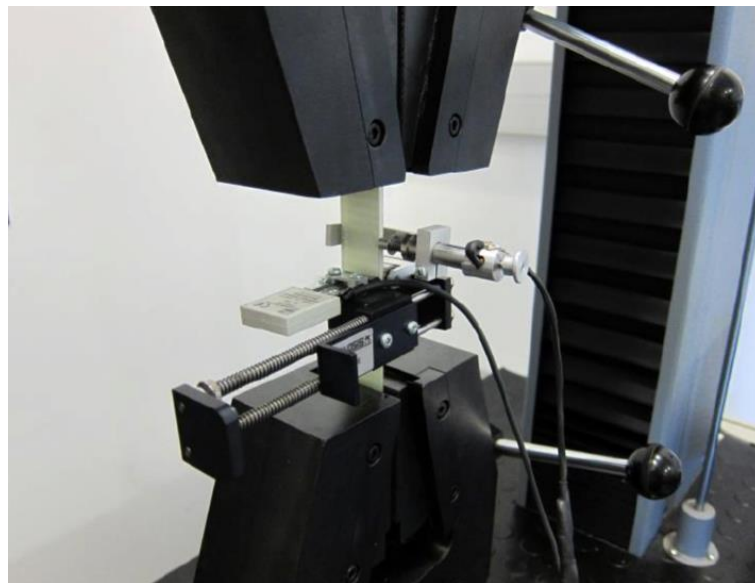


Figura 4.6 Máquina de ensayos Servosis ME-405/10.

Para calcular, la deformación en x e y (ϵ_x y ϵ_y) se utilizan unos extensómetros.

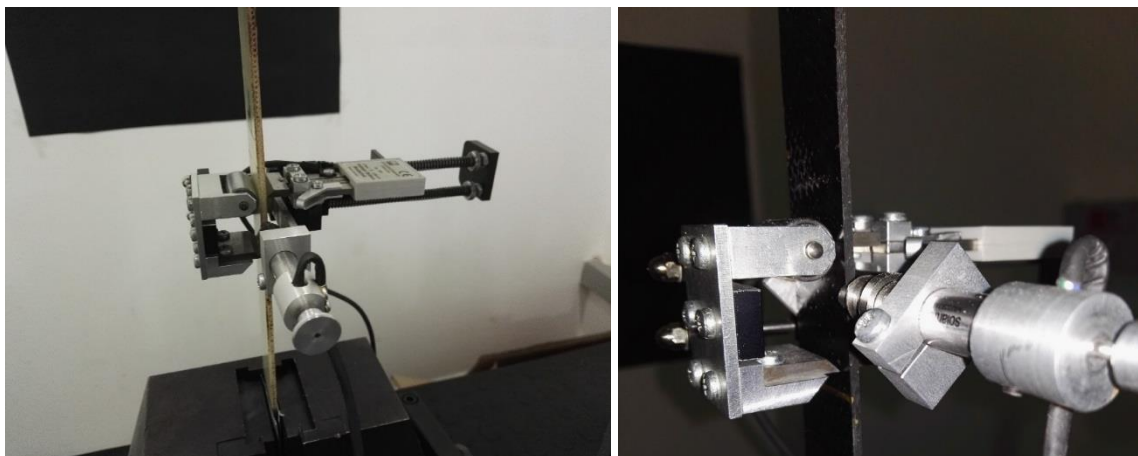


Figura 4.7 Extensómetros longitudinal y transversal.

Extensómetro longitudinal: Colocado a lo largo de la probeta, mide la elongación entre dos puntos alineados a lo largo del eje de la muestra. Tiene una L0 de 25 mm y una carrera de 2.5mm. Conectado al auxiliar 1.

Extensómetro transversal: Colocado a lo ancho de la probeta, mide cuanto se acorta en la dirección Y la muestra. Tiene una L0 igual al ancho de la probeta y una carrea de 1.5mm. Conectado al auxiliar 2.



Figura 4.8 Salidas de los auxiliares.

El software encargado de trazar y analizar los datos del ensayo es el PCD 2K.

La **célula de trabajo** es la de 10T. Para seleccionarla ir a *Configuración* > *Abrir* > *Mis documentos*

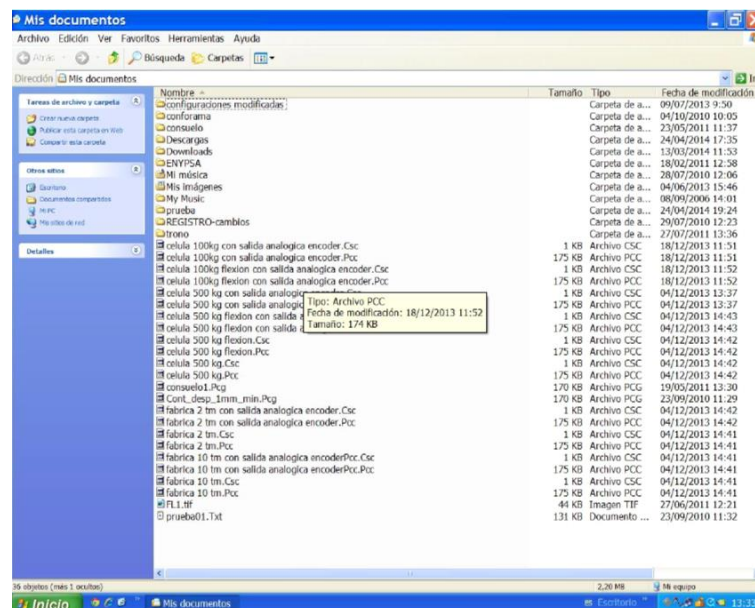


Figura 4.9 Selección de la célula de trabajo.

La **velocidad** del ensayo es de 2 mm/min llevando las probetas hasta la rotura. En el apartado de *Generación de Funciones* dentro de PCD 2K, tendremos que comprobar que la velocidad es la mencionada.

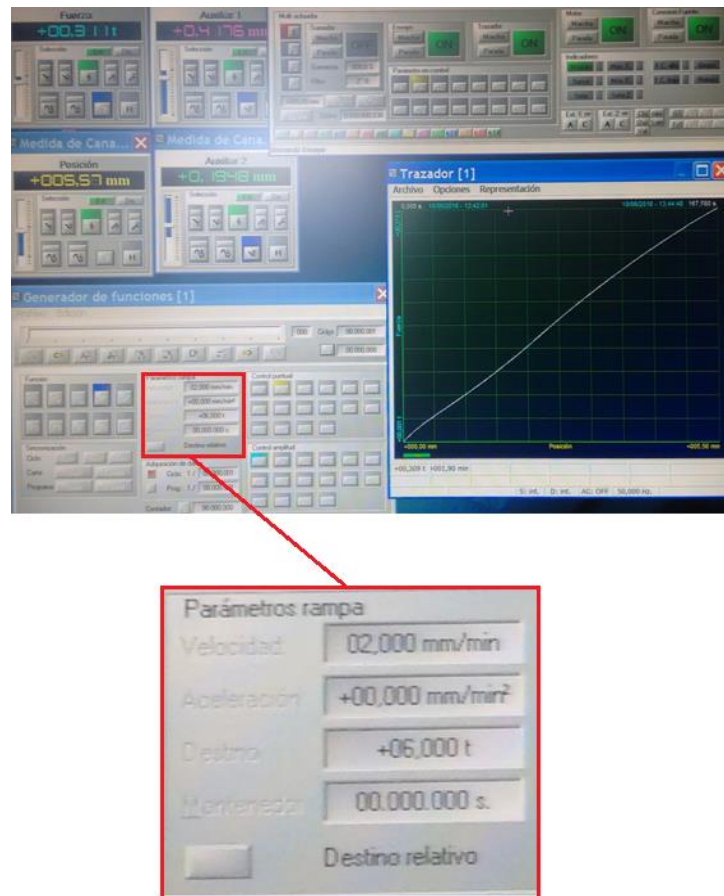


Figura 4.10 Configuración parámetros del ensayo de tracción.

4.5 Tratamiento de datos

Los datos obtenidos directamente del ensayo son: Fuerza (T), Posición (mm), Auxiliar 1 (mm), Auxiliar 2 (mm).

	A	B	C	D	E	F	G
1	Samples	1024					
2	Tiempo (s)	292,16					
3	Tiempo	Fuerza	Posición	Auxiliar 1	Auxiliar 2	Diferencia	Hora
4	s	t	mm	mm	mm		
5	0	0,004	0	0,0001	0	10/06/2016	10:08:58
6	0,28	0,004	0	0,0001	0	10/06/2016	10:08:59
7	0,56	0,004	0	0,0001	0	10/06/2016	10:08:59
8	0,84	0,004	0	0,0001	0	10/06/2016	10:08:59
9	1,14	0,005	0	0,0001	0	10/06/2016	10:08:59
10	1,42	0,005	0,01	0,0002	0	10/06/2016	10:09:00
11	1,7	0,006	0,02	0,0003	0	10/06/2016	10:09:00
12	1,98	0,007	0,03	0,0004	0	10/06/2016	10:09:00
13	2,28	0,007	0,04	0,0005	0,0001	10/06/2016	10:09:01
14	2,56	0,008	0,05	0,0005	-0,0001	10/06/2016	10:09:01
15	2,84	0,009	0,05	0,0005	0	10/06/2016	10:09:01
16	3,12	0,009	0,06	0,0007	0	10/06/2016	10:09:01

Figura 4.11 Datos obtenidos del ensayo de tracción.

Conocidos estos datos, la sección de la probeta y la separación inicial de los auxiliares; se pueden obtener ϵ_x y ϵ_y (deformaciones en las direcciones x e y) y σ (tensión).

$$\epsilon_x = \frac{Auxiliar_1}{l_0} \tag{4.13}$$

Donde $Auxiliar_1$ y l_0 son el desplazamiento en dirección longitudinal que detecta el extensómetro y la separación inicial del mismo respectivamente.

$$\epsilon_y = \frac{Auxiliar_2}{ancho} \tag{4.14}$$

Donde $Auxiliar_2$ y $ancho$ son el desplazamiento en dirección transversal que detecta el extensómetro y el ancho de la probeta respectivamente.

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{4.15}$$

Donde F es la fuerza y A el área de la sección.

Siendo:

$$A = e \cdot ancho \tag{4.16}$$

Donde e es el espesor de la probeta.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Nombre	CD_1						Media	Desv
2				b (mm)	24,58	24,52	24,61	24,5689	0,0476484
3				e (mm)	2,36	2,34	2,31	2,3389	0,02501851
4									
5									
6	Epsilon x	sigma x (MPa)		Epsilon x	ABS(Epsilon y)		x	y	
7	0,000004	0,682863487		0,000004	0		Lo (mm)	25	24,5688889
8	0,000004	0,682863487		0,000004	0		A (mm2)	57,46390123	
9	0,000004	0,682863487		0,000004	0				
10	0,000004	0,682863487		0,000004	0				
11	0,000004	0,853579359		0,000004	0				
12	0,000008	0,853579359		0,000008	0				
13	0,000012	1,024295231		0,000012	0				
14	0,000016	1,195011103		0,000016	0				
15	0,00002	1,195011103		0,00002	4,07019E-06				
16	0,00002	1,365726975		0,00002	-4,07019E-06				

Figura 4.12 Tratamiento datos ensayo de tracción

4.6 Resultados

4.6.1 Laminado de fibra de carbono

Cinco muestras han sido sometidas a ensayo. Mediante la representación gráfica de los valores obtenidos en el apartado anterior se obtienen: El módulo elástico E_x , la tensión de rotura X y el coeficiente de Poisson ν_{xy} .

Probeta 1:

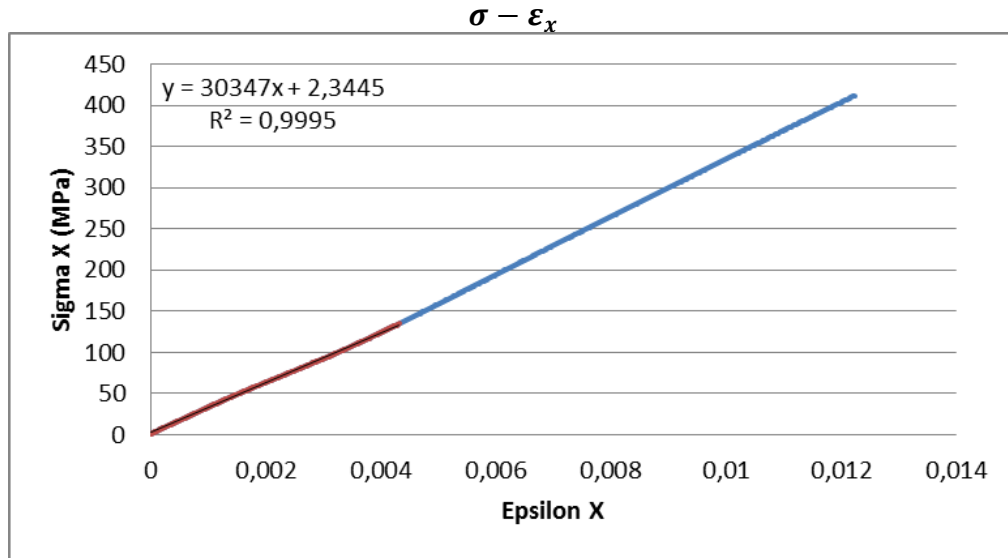


Figura 4.13 Curva $\sigma-\epsilon_x$ probeta 1, fibra de carbono.

$$E_x = 30347 \text{ MPa}$$

$$X = 412 \text{ MPa}$$

El ajuste lineal se ha limitado al principio de la gráfica por ser esta zona la más representativa del comportamiento elástico lineal de la muestra.

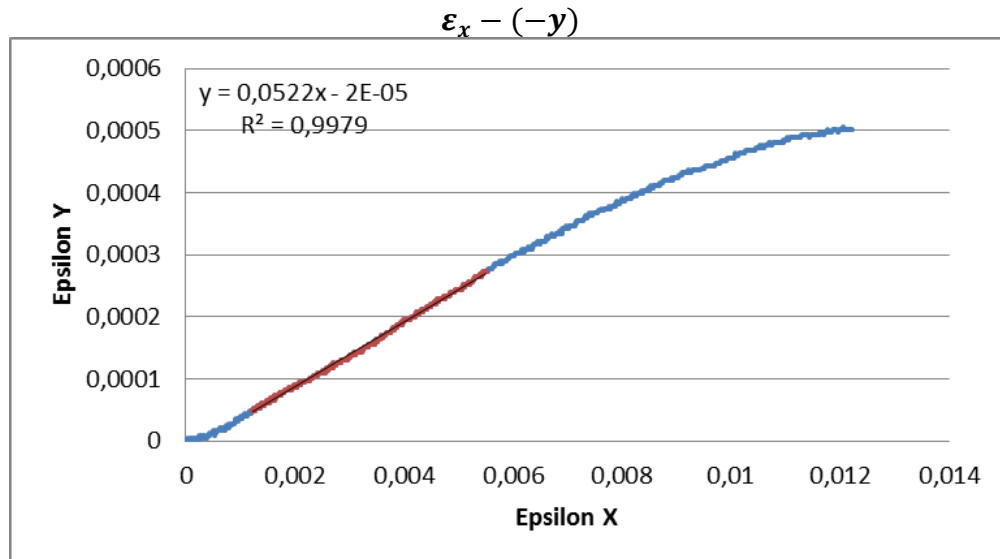


Figura 4.14 Curva $\epsilon_x-\epsilon_y$ probeta 1, fibra de carbono.

$$\nu_{xy} = 0,05$$

Los valores obtenidos para el coeficiente de Poisson son muy poco fiables debido a que su valor real está muy cercano al cero y este es difícil de determinar. El coeficiente de Poisson obtenido de forma experimental será desestimado, en su lugar se tomará como valor para dicho coeficiente el determinado por el estudio de Micromecánica.



Figura 4.15 Probetas carbono, ensayo de tracción.

4.6.2 Laminado de fibra de vidrio

Probeta 1:

Cinco muestras han sido sometidas a ensayo. Mediante la representación gráfica de los valores obtenidos en el apartado anterior se obtienen: El módulo elástico E_x , la tensión de rotura X y el coeficiente de Poisson ν_{xy} .

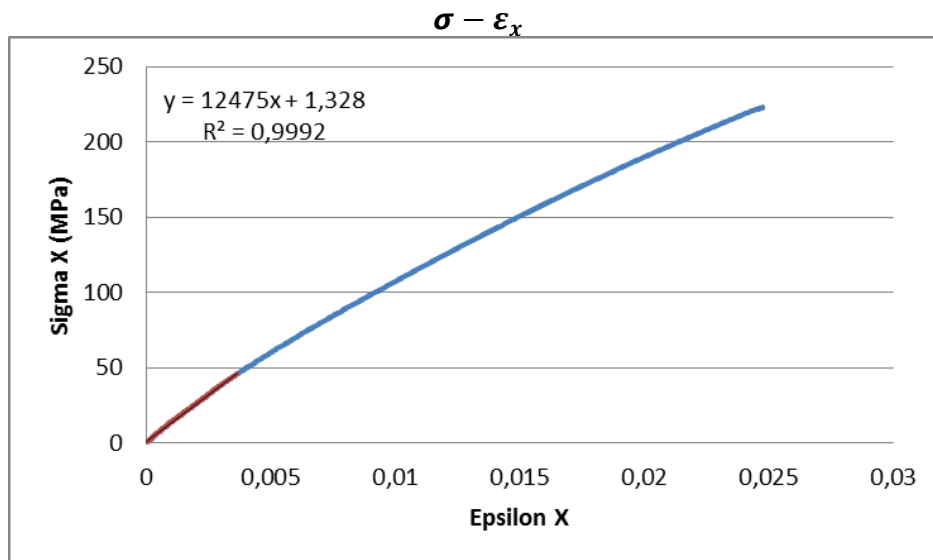


Figura 4.16 Curva σ - ϵ_x probeta 1, fibra de vidrio.

$$E_x = 12457 \text{ MPa}$$

$$X = 223 \text{ MPa}$$

El ajuste lineal se ha limitado al principio de la gráfica por ser esta zona la más representativa del comportamiento elástico lineal de la muestra.

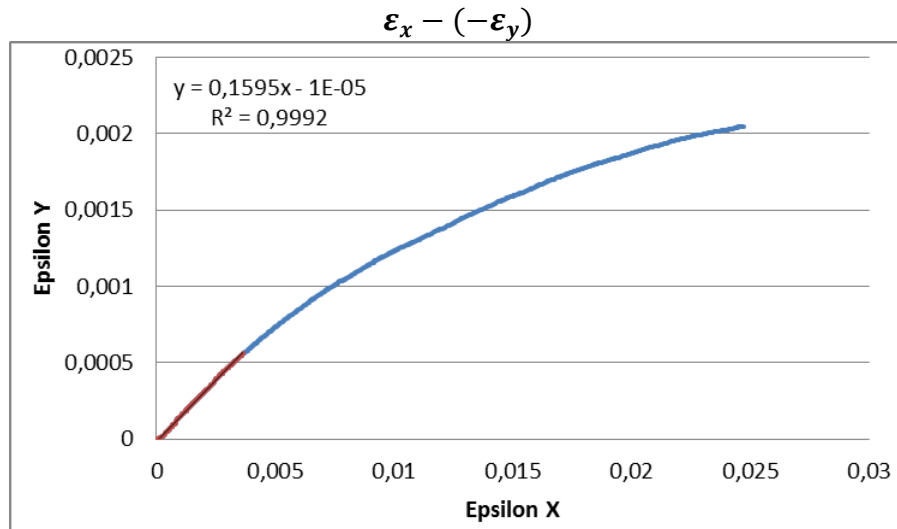


Figura 4.17 Curva $\epsilon_x - (-\epsilon_y)$ probeta 1, fibra de vidrio.

$$\nu_{xy} = 0,16$$

Los valores obtenidos para el coeficiente de Poisson son muy poco fiables debido a que su valor real está muy cercano al cero y este es difícil de determinar. El coeficiente de Poisson obtenido de forma experimental será desestimado, en su lugar se tomará como valor para dicho coeficiente el determinado por el estudio de Micromecánica.



Figura 4.18 Probetas fibra de vidrio, ensayo de tracción.

4.7 Resumen de resultados

Tabla 4-4 Resultados ensayos de tracción.

Análisis C0

Probeta	Ancho (mm)	Desviación	Espesor (mm)	Desviación	A (mm ²)	X (MPa)	E _x (MPa)	R ²	ν_{xy}	R ²	Observaciones
C0_1	24,57	0,05	2,34	0,03	57,46	412	30347	0,9995	0,05	0,9979	Correcto
C0_2	24,55	0,20	2,32	0,05	57,03	411	34887	0,9998	0,17*	0,9971	Gráfica muy irregular
C0_3	24,81	0,10	2,38	0,03	58,98	363*	33720	0,9999	0,08	0,9987	Gráfica correcta, rotura en borde
C0_4	24,71	0,28	2,48	0,04	61,21	391	30578	0,9999	0,05	0,9949	Irregularidades de la curva
C0_5	24,58	0,07	2,39	0,03	58,70	386*	33432	0,9997	0,09*	0,9668	Gráfica muy irregular, rotura en borde
Resultados			Media	Desviación							
Valor*	Descartado	X (MPa)	405	12	Nota: Para el estudio módulo elástico y del coeficiente de Poisson se han utilizado diferentes rangos de valores para la misma probeta. Esto se ha hecho así, para poder obtener resultados del coeficiente de Poisson con un coeficiente						
Valor	Aceptado	E_x (MPa)	32593	2021							
		ν_{xy}	0,06	0,02							

Análisis V0

Probeta	Ancho (mm)	Desviación	Espesor (mm)	Desviación	A (mm ²)	X (MPa)	E _x (MPa)	R ²	ν_{xy}	R ²	Observaciones
V0_1	24,95	0,22	2,84	0,03	70,73	223*	12475	0,9992	0,16	0,9992	Correcto. Rotura borde
V0_2	24,50	0,50	2,72	0,01	66,75	257	11307	0,9996	0,13	0,9991	Correcto
V0_3	24,54	0,21	2,75	0,03	67,42	262	13604	0,9990	0,20	0,9990	Correcto
V0_4	24,70	0,21	2,73	0,01	67,54	260	13507	0,9992	0,17	0,9991	Correcto
V0_5	25,06	0,05	2,67	0,03	66,86	243*	10264	0,9997	0,10	0,9997	Correcto. Rotura borde
Resultados			Media	Desviación							
Valor*	Descartado	X (MPa)	260	130							
Valor	Aceptado	E_x (Mpa)	12231	1440							
		ν_{xy}	0,15	0,04							

5 Ensayo de cizalladura

5.1 Objetivo

El ensayo de cizalladura tiene como objetivo obtener:

- El módulo de cizalladura E_6
- La resistencia a cizalladura $\tau_{m\acute{a}x}$ para el que se produce el FPF (First Play Failure, es decir, el fallo de la primera lámina)

5.2 Fundamento

- El módulo de cizalladura E_6 : Es la tangente de la recta del gráfico tensión-deformación angular τ - γ
- Resistencia a cizalladura $\tau_{m\acute{a}x}$: Se obtiene de la gráfico tensión-deformación angular τ - γ

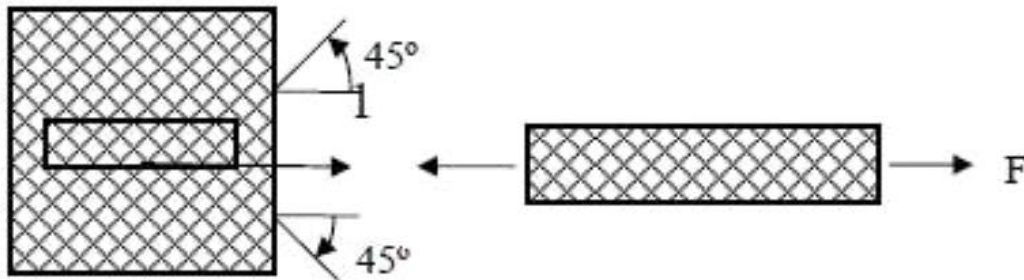


Figura 4.19 Tracción a 45°.

La probeta se deforma longitudinal y transversalmente. En la curva tensión-deformación angular se observa una recta de pendiente constante. Llega un punto en el que el material no es capaz de soportar la carga en la situación en la que se encuentra, y las fibras se reorientan en la dirección de la carga. Esto se puede observar en el gráfico como un mantenimiento de la carga frente a la deformación. Llegado a ese punto, el ensayo carece de interés. Siendo solo objeto de estudio los datos obtenidos hasta que se produce la reorientación de la fibra.

5.3 Probeta

Las probetas son iguales a las empleadas en el ensayo de tracción, proceden de las mismas placas, pero están cortadas a 45° respecto a las anteriores. De esta forma se consigue un laminado [45/-45°]3s.

5.4 Maquinaria y software

La maquinaria y software utilizados son los mismos que los empleados en el ensayo de tracción. Se utiliza la misma configuración, célula de carga de 10 T y velocidad de ensayo de 2 mm/s

5.5 Tratamiento de datos

Los datos obtenidos directamente del ensayo son: Fuerza (T), Posición (mm), Auxiliar 1 (mm), Auxiliar 2 (mm).

	A	B	C	D	E	F	G
1	Samples	1024					
2	Tiempo (s)	485,34					
3	Tiempo	Fuerza	Posición	Auxiliar 1	Auxiliar 2	Diferencia	Hora
4	s	t	mm	mm	mm		
5	0	0,004	0	-0,0002	0	10/06/2016	12:56:35
6	0,46	0,003	0	-0,0002	-0,0001	10/06/2016	12:56:35
7	0,94	0,004	0	-0,0002	0	10/06/2016	12:56:36
8	1,42	0,003	0	-0,0002	-0,0001	10/06/2016	12:56:36
9	1,88	0,004	0	-0,0002	0	10/06/2016	12:56:37
10	2,36	0,004	0,01	0	0,0001	10/06/2016	12:56:37
11	2,84	0,005	0,03	0,0008	0,0002	10/06/2016	12:56:38
12	3,3	0,006	0,04	0,001	0,0002	10/06/2016	12:56:38

Figura 4.20 Tratamiento de los datos ensayo de cizalladura.

Conocidos estos datos, la sección de la probeta y la separación inicial de los auxiliares; se pueden obtener ϵ_x, ϵ_y y τ .

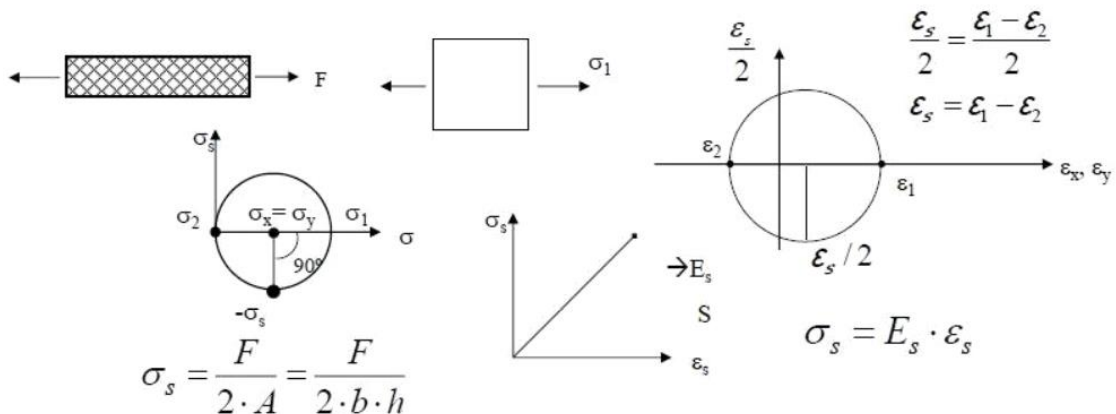


Figura 4.21 Obtención de la deformación angular y la tensión de cizalladura mediante Mohr.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Nombre	C45_2						Media	Desv
2				b (mm)	25,19	25,13	24,96	25,09	0,12
3				e (mm)	2,08	2,13	2,04	2,08	0,05
4									
5									
6	Gamma	Sigma S (MPa)		Epsilon x	Epsilon y			x	y
7	6,39702E-05	0,37570362		0,000056	-7,97024E-06		Lo (mm)	25	25,0933333
8	0,000111896	0,469629525		0,000084	-2,78959E-05		A (mm2)	52,2220148	
9	0,000151836	0,657481335		0,000108	-4,38363E-05				
10	0,000191777	0,75140724		0,000132	-5,97768E-05		Resultados		
11	0,000235702	0,93925905		0,000156	-7,97024E-05				
12	0,000271643	1,033184954		0,000176	-9,56429E-05		S (Mpa)	54,7588026	
13	0,000303598	1,127110859		0,000196	-0,000107598		E6 (Mpa)	2704	
14	0,000347524	1,221036764		0,00022	-0,000127524				

Figura 4.22 Tratamiento de los datos ensayo de cizalladura.

5.6 Resultados

5.6.1 Laminado de fibra de carbono

Probeta 1

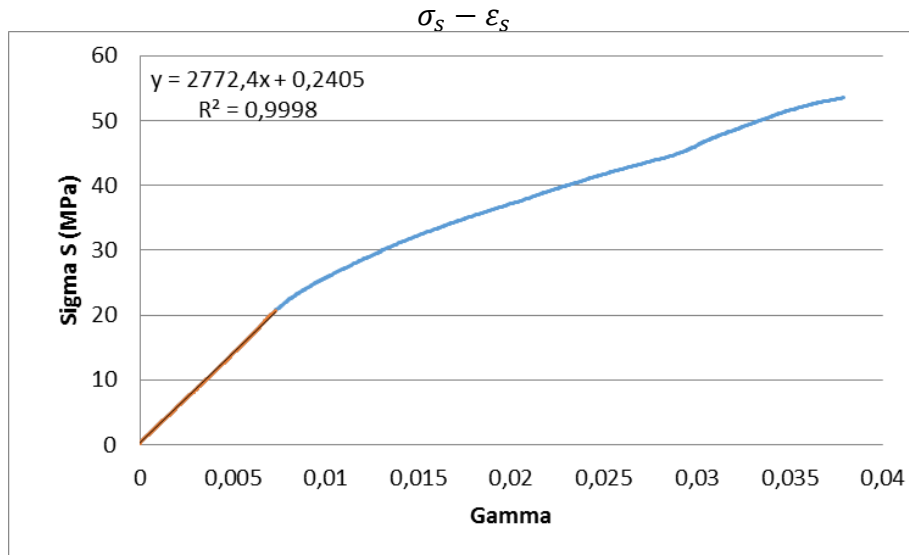


Figura 4.23 Curva $\sigma_s - \epsilon_s$ probeta 1, fibra de carbono.

$$E_s = 2772,4 \text{ MPa}$$

$$S = 53,56 \text{ MPa}$$



Figura 4.24 Reorientación de las fibras de carbono.

5.6.2 Laminado de fibra de vidrio

Probeta 1

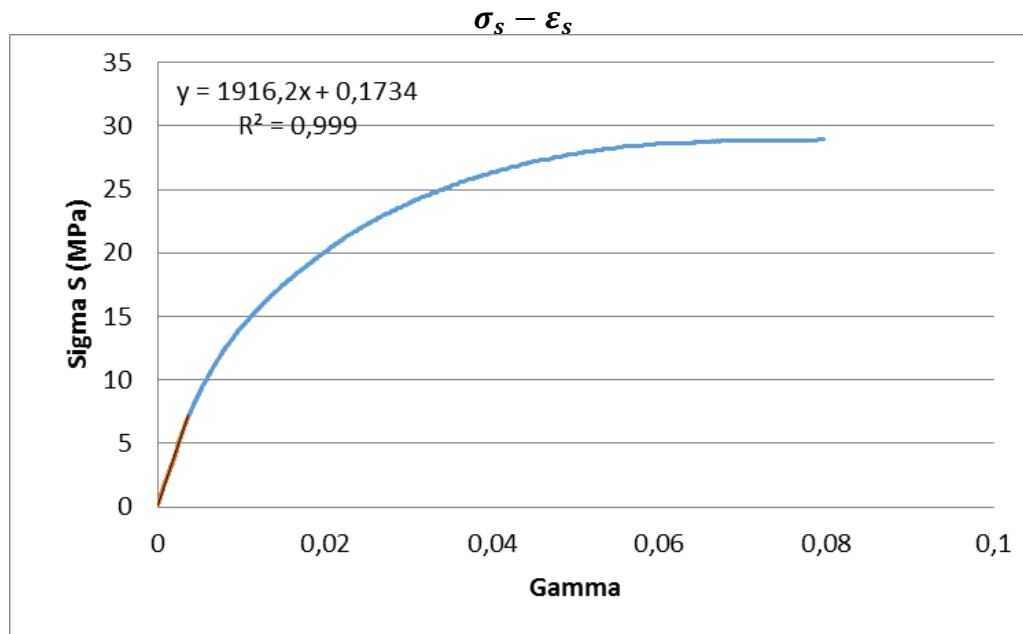


Figura 4.25 Curva $\sigma_s - \epsilon_s$ probeta 1, fibra de carbono.

$$E_s = 1916,2 \text{ MPa}$$

$$S = 28,93 \text{ MPa}$$

5.7 Resumen de resultados

Tabla 4-5 Resultados ensayos de cizalladura.

Análisis C45

Probeta	Ancho (mm)	Desviación	Espesor (mm)	Desviación	A (mm ²)	E ₆ (MPa)	R ²	S (Mpa)	Observaciones
C45_1	24,60	0,04	2,10	0,06	51,56	2772	0,9998	53,56	Correcto
C45_2	25,09	0,12	2,08	0,05	52,22	2704	0,9990	54,76	Correcto
C45_3	24,63	0,25	2,30	0,09	56,74	4542*	0,9851	47,37	Irregular en la zona de estudio
C45_4	24,91	0,28	2,17	0,03	54,02	2743	0,9998	51,75	Correcto
C45_5	24,42	0,39	2,24	0,02	54,63	2299	0,9999	51,62	Correcto
Resultados del análisis			Media	Desviación					
Valor*	Descartado	E₆ (MPa)	2629	222					
Valor	Aceptado	S (Mpa)	51,81	2,81					

Análisis V45

Probeta	Ancho (mm)	Desviación	Espesor (mm)	Desviación	A (mm ²)	E ₆ (MPa)	R ²	S (Mpa)	Observaciones
V45_1	25,01	0,08	2,79	0,12	69,68	1916	0,9990	28,93	Correcto.
V45_2	24,79	0,22	2,76	0,09	68,31	2138*	0,9982	29,94	Zona de estudio muy pequeña.
V45_3	24,69	0,03	2,74	0,04	67,63	3506*	0,9633	28,36	Gráfica irregular
V45_4	25,07	0,09	2,72	0,10	68,25	2712*	0,9978	31,98	Irregular en la zona de estudio.
V45_5	24,88	0,18	2,75	0,05	68,42	1819	0,9990	31,18	Correcta
Resultados del análisis			Media	Desviación					
Valor*	Descartado	E₆ (MPa)	1868	68					
Valor	Aceptado	S (Mpa)	30,08	1,51					

6 Estimación de propiedades mediante Micromecánica.

A partir de los ensayos descritos en los apartados anteriores hemos obtenido las constantes elásticas y de rotura de la lámina, tanto a tracción como a cizalladura intralaminar. Sin embargo si se desea realizar simulaciones de degradación, sería necesario realizar otros ensayos, tales como compresión. En este trabajo y aunque no se van a realizar cálculos de degradación, en previsión de su posterior utilización va a exponerse un método de estimación de tales propiedades propuesto por Think Composites (Think Composites, 1991)

La hoja de cálculo MIC-MAC tiene una gran base de datos de diferentes materiales compuestos. Todos ellos materiales unidireccionales a partir de los cuales es posible definir diferentes laminados. Así mismo, la hoja de cálculo estima mediante ecuaciones de Micromecánica y a partir de las características de los constituyentes de las láminas (fibra, resina) y sus porcentajes en volumen, la evolución de las propiedades de la lámina y así como las del laminado.

En nuestro caso, se trata de modelizar un tejido tipo sarga mediante dos láminas de material unidireccional $[0_{0,5}/90_{0,5}]_S$. Las diferencias de comportamiento fundamentales entre esta modelización y el comportamiento del tejido son:

- Debido al entrelazado entre fibras, el tejido presenta un módulo de elasticidad inferior al de un laminado.
- En un ensayo de tracción, un tejido presenta una rotura catastrófica mientras que el laminado $[0/90]$ comienza por la rotura de las láminas a 90 grados y termina por las de 0 grados.

6.1 Procedimiento

En nuestro caso, únicamente disponemos de los módulos de elasticidad longitudinal y de cizalladura, así como el porcentaje de fibra en volumen. El procedimiento de estimación sería:

1. Dado que los ensayos que vamos a simular son planos (tracción, compresión y cizalladura intralaminar) seleccionamos la hoja de cálculo IN PLANE.
2. Seleccionamos mediante la macro MATERIAL el material unidireccional más próximo al nuestro.
3. Introducimos en la casilla D18, el porcentaje en volumen de fibra que hemos obtenido en el ensayo. A partir de este valor (que depende del proceso de fabricación) se estiman las propiedades de la lámina (columna L).
4. Definimos el laminado $[0/90]$, introduciendo 0,5 en B4 y C4 (asegurándonos que en B3 y B4 tenemos puesto 0 y 90 respectivamente). El número de repeticiones (F4) es indiferente.
5. En las casillas F7 a F9 encontraremos E_x , E_y y E_s respectivamente. Como podremos comprobar, los valores estimados son ligeramente superiores a los medidos experimentalmente (debido al entretejido). Para tener en cuenta ese entretejido disminuirémos los módulos de elasticidad de la fibra (F18) y de la matriz (E18) hasta ajustar los valores de E_x y E_s a los medidos. En la casilla W25 encontraremos el

coeficiente de Poisson. Por otro lado, el módulo de elasticidad en la dirección z corresponderá con la transversal del unidireccional (L6). A partir de aquí, tendremos una modelización de las constantes elásticas de la lámina de tejido. Nos falta ahora estimar las propiedades de rotura.

6. Para estimar las propiedades de rotura, tendremos que conseguir que la rotura primera lámina (G23) y la rotura última lámina (G24) coincidan. Para ello, modificaremos la resistencia de la matriz (G18) hasta conseguir que la rotura primera lámina (G23) y la rotura última lámina (G24) coincidan. Para ello simularemos los diferentes ensayos y obtendremos una estimación de las tensiones de rotura correspondientes.
 - a. Ensayo de tracción en la dirección X (en nuestro caso al tratarse de un tejido equilibrado será igual en Y). Introduciremos en la casilla B7 un valor de fuerza de tracción de 1.
 - b. Modificamos la resistencia de la matriz (G18). Obtenemos en la casilla C12 el valor de la resistencia de a tracción en la dirección X.
 - c. Ensayo de compresión en la dirección X (ídem Y). Introducimos en la casilla B7 un valor de fuerza de compresión de -1, el valor de resistencia a compresión lo leemos en C12.
 - d. Ensayo de cizalladura. Introducimos en la casilla B9 un valor de fuerza de cizalladura de 1. El valor de resistencia a cizalladura lo leemos en C14.

6.2 Laminado de fibra de carbono (T300/52)

Tabla 4-6 Propiedades estimadas de la fibra de carbono.

Propiedades obtenidas de forma experimental	Propiedades introducidas en MIC-MAC		Propiedades estimadas mediante MIC-MAC	
	Propiedad	Casilla	Propiedad	Casilla
$\%V_f = 29\%$	$\%V_f = 29\%$	D18		
$\rho = 1270 \text{Kg/m}^3$	$E_m = 3,30 \text{GPa}$	E18		
$E_1 = E_2 = 32593 \text{MPa}$	$E_f = 206 \text{GPa}$	F18	$E_1 = E_2 = 32600 \text{MPa}$	F7
$E_6 = 2629 \text{MPa}$	$X_m = 40 \text{MPa}$		$E_6 = 2600 \text{MPa}$	F9
			$E_3 = 5190 \text{MPa}$	L6
			$E_4 = E_5 = 2590 \text{MPa}$	L8
$X = Y = 405 \text{MPa}$			$X = Y = 304 \text{MPa}$	C12
			$X' = Y' = 411 \text{MPa}$	C12
$S = 52 \text{MPa}$			$S = 73 \text{MPa}$	C14
$\nu_{12} = 0,06$			$\nu_{12} = 0,04$	W25
			$\nu_{12} = \nu_{12} = 0$	W27

6.3 Laminado de fibra de vidrio (E-g/ep)

Tabla 4-7 Propiedades estimadas de la fibra de vidrio.

Propiedades obtenidas de forma experimental	Propiedades introducidas en MIC-MAC		Propiedades estimadas mediante MIC-MAC	
	Propiedad	Casilla	Propiedad	Casilla
$\%V_f = 24,9\%$	$\%V_f = 24,9\%$	D18		
$\rho = 1426 \text{Kg/m}^3$	$E_m = 2,60 \text{GPa}$	E18		
$E_1 = E_2 = 12231 \text{MPa}$	$E_f = 80 \text{GPa}$	F18	$E_1 = E_2 = 12100 \text{MPa}$	F7
$E_6 = 1868 \text{MPa}$	$X_m = 98 \text{MPa}$		$E_6 = 1900 \text{MPa}$	F9
			$E_3 = 4190 \text{MPa}$	L6
			$E_4 = E_5 = 1920 \text{MPa}$	L8
$X = Y = 260 \text{MPa}$			$X = Y = 298 \text{MPa}$	C12
			$X' = Y' = 228 \text{MPa}$	C12
$S = 30 \text{MPa}$			$S = 234 \text{MPa}$	C14
$\nu_{12} = 0,15$			$\nu_{12} = 0,09$	W25
			$\nu_{12} = \nu_{12} = 0$	W27

7 Conclusiones

Los resultados obtenidos mediante los ensayos de tracción y cizalladura presentan unas desviaciones inferiores en todo caso al 8% respecto al valor nominal (exceptuando los coeficientes de Poisson). Esto indica una buena repetitividad de los ensayos y un comportamiento similar de las probetas. Pero este hecho no implica que los resultados sean correctos ya que la irregularidad de las probetas y su proceso artesanal de fabricación ponen en duda que los valores obtenidos caractericen realmente al material. Este hecho se pone de manifiesto en el apartado cinco de este capítulo, donde se observa que los valores de rotura obtenidos de forma experimental y estimada son muy dispares. Las conclusiones a las que se llega:

- Buena repetitividad y comportamiento similar de las probetas ensayadas.
- No se ha determinado de forma correcta el coeficiente de Poisson porque su orden de magnitud es muy pequeño y es necesario una gran sensibilidad del equipo para medirlo de forma correcta.
- Fabricación artesanal de las probetas, introduciendo todo tipo de errores e imperfecciones que ponen en duda los resultados.
- Corte irregular de las probetas, no se mantiene ni el paralelismo ni la rectitud.
- Los resultados del proceso de quemado son más fiables que los resultados obtenidos por el proceso de digestión, este último es mucho más complejo, lo que se traduce en introducción de mayor incertidumbre en los resultados.

Capítulo 5 Caracterización de los núcleos

1 Introducción

El núcleo de las palas de pádel Marvel, objeto de estudio de este TFG, está constituido por una espuma de polietileno. Este capítulo trata sobre la caracterización y estudio de dicha espuma. Para ello ha sido sometida a ensayos de impacto y compresión a diferentes velocidades para comprobar cómo influye esta en su comportamiento.

2 Fabricación de las probetas

El núcleo de las palas de pádel Marvel está constituido por una espuma de polietileno. Para su estudio se han extraído probetas cilíndricas de una plancha de dicho material. Dichas probetas tienen 50 mm de diámetro y 38 mm de espesor.

Para su obtención se ha creado un utillaje específico, que acoplado a un torno permite la extracción de las probetas de forma rápida y sin dañar el material de estudio. El torno se acciona de forma manual debido a que la velocidad mínima que este alcanza es muy elevada para cortar este tipo de material.



Figura 5.1 Probetas de espuma polimérica.

3 Cálculo aproximado de densidad

Se ha realizado un cálculo aproximado de la densidad aparente del material del núcleo mediante el pesado de las probetas y la medida del diámetro y espesor de las mismas.

Tabla 5-1 Cálculo de la densidad aparente.

Nº Probeta	Espesor (mm)	Diámetro (mm)	Volumen (cm ³)	Peso (g)	Densidad (kg/m ³)
14	37,18	49,55	71,69	1,91	26,64
15	37,73	49,55	72,76	1,94	26,66
16	37,45	48,68	69,70	1,92	27,55
17	37,59	49,35	71,90	1,97	27,40
18	37,58	48,84	70,40	1,95	27,70
19	36,91	49,65	71,46	2,05	28,69
20	37,62	48,44	69,33	1,92	27,69
21	37,10	47,80	66,58	1,95	29,29
22	37,38	47,88	67,30	1,90	28,23

Siendo la densidad aparente media de $27,8 \pm 0,9 \text{ kg/m}^3$

Valor muy cercano al recogido en la ficha técnica: $28,00 \text{ kg/m}^3$

4 Ensayo de compresión

4.1 Objetivo

El ensayo de compresión tiene como objetivo determinar el módulo de elasticidad E_x del núcleo a baja velocidad.

4.2 Fundamento

El módulo de elasticidad E_x se obtiene mediante la Ley de Hooke y los valores de las deformaciones ε_x que se calculan a partir del desplazamiento que se produzca en el ensayo. E_x es la pendiente de la gráfica tensión-deformación, donde σ_x es la tensión.

$$\sigma_x = E_x \cdot \varepsilon_x \quad (5.1)$$

El ensayo se ha realizado con dos velocidades de aplicación de carga distintas y con dos situaciones de restricción distintas: restringido, la probeta se coloca en el interior de un utensilio que limita su desplazamiento; y libre, sin coartar los desplazamientos de la probeta.

4.3 Maquinaria y software

La maquinaria y software utilizados son los mismos que en el ensayo de tracción (ver Capítulo 4), pero configurados para comprimir la probeta, sustituyendo las mordazas por discos planos. La célula de carga empleada es de 500 kg.

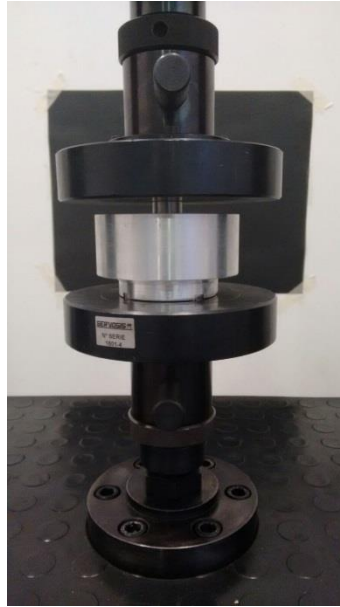


Figura 5.2 Ensayo de compresión, desplazamiento restringido.

Para no aplicar la carga directamente sobre las probetas, se ha creado un utillaje especial que colocado entre la probeta y el disco de carga de la máquina permite una transmisión homogénea de la carga, facilitando de esta forma el cálculo de la tensión.

Por otra parte se ha creado un utensilio en el que se puede introducir la probeta durante el ensayo para estudiar su comportamiento con las mismas condiciones de carga, pero con los desplazamientos restringidos. (Ver figura 5.2 y 5.3).



Figura 5.3 Utillaje para aplicación de carga de forma homogénea, utensilio para restringir los movimientos de la espuma y varilla para extraer la espuma.

4.4 Tratamiento de datos

Los datos obtenidos directamente del ensayo son: Fuerza (T) F y Posición (mm).

Conocidos estos datos, el área la sección A y espesor de la probeta L , se pueden obtener la deformación ε_x y la tensión σ

$$\varepsilon_x = \frac{\text{Posición}}{L} \quad (5.2)$$

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (5.3)$$

Siendo:

$$A = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \quad (5.3)$$

Donde D es el diámetro de la probeta.

4.5 Resultados

Se han estudiado tres probetas por cada situación diferente de ensayo, utilizándose un total de doce muestras. Ver todos los ensayos en Anexo C

Mediante la representación gráfica de los datos tratados del ensayo, se obtienen:

4.5.1 Desplazamiento libre

- Velocidad alta: 5 mm/s

Probeta 2:

$$L = 37,36 \text{ mm}$$

$$F_{\text{máx}} = 48,66 \text{ N}$$

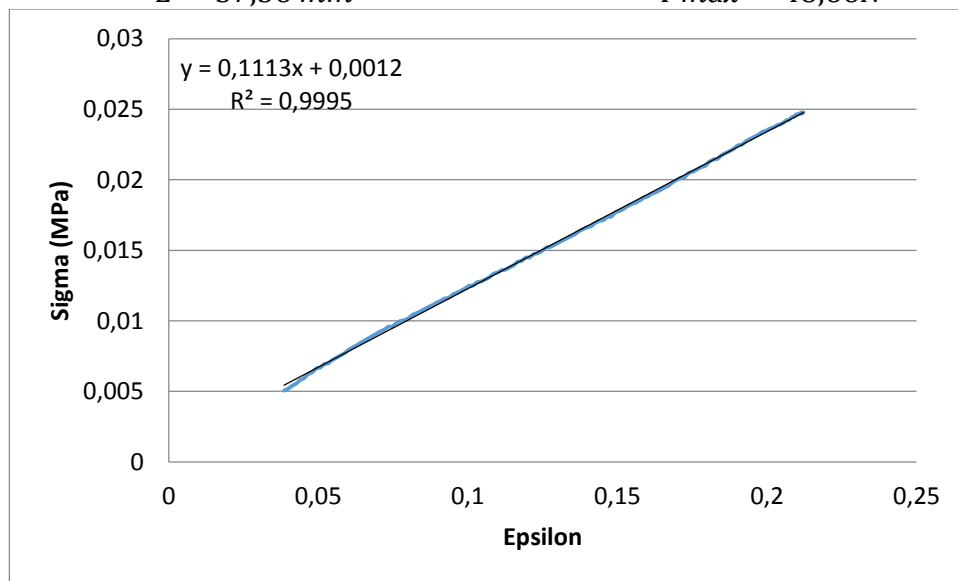


Figura 5.4 Curva σ - ϵ , probeta 2. desplazamiento libre, velocidad 5 mm/s

$$E_{V5} = 0,1113 \text{ MPa}$$

- Velocidad baja: 0,83 mm/s

Probeta 5:

$$L = 36,07mm$$

$$F_{m\acute{a}x} = 46,70N$$

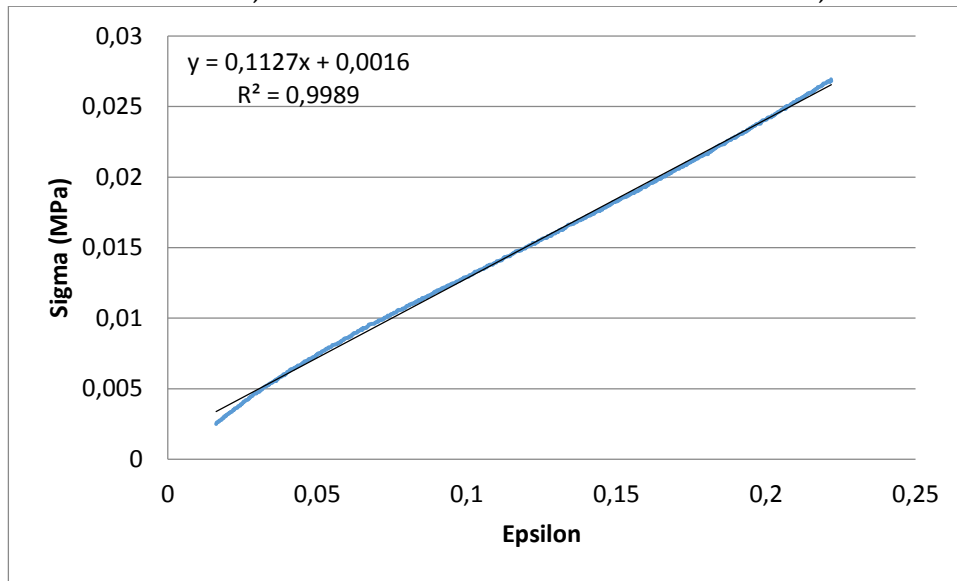


Figura 5.5 Curva σ - ϵ , probeta 5. desplazamiento libre, velocidad 0,83 mm/s

$$E_{V0.8} = 0,1127MPa$$

4.5.2 Desplazamiento restringido

- Velocidad alta: 5 mm/s

Probeta 8:

$$L = 37,49mm$$

$$F_{m\acute{a}x} = 76,32N$$

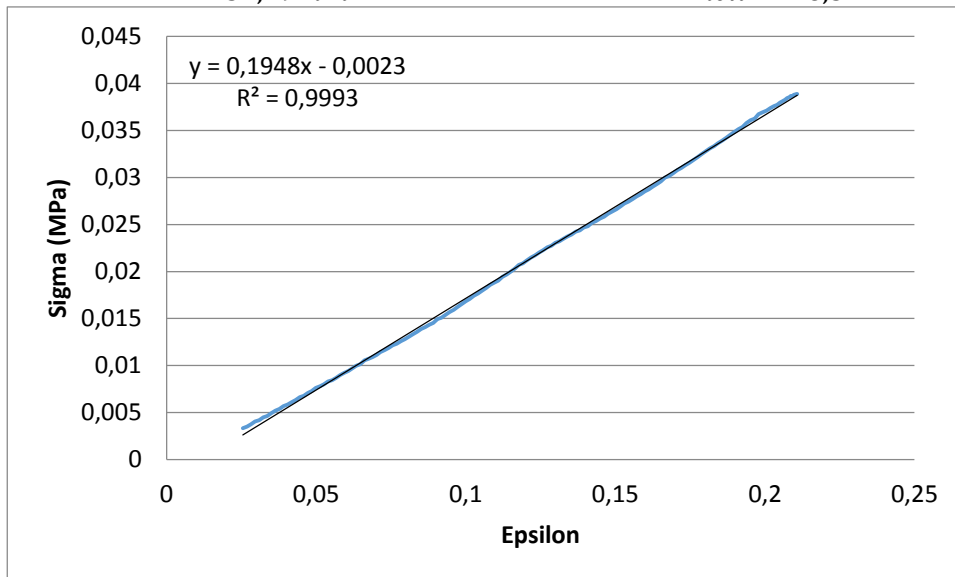


Figura 5.6 Curva σ - ϵ , probeta 8. desplazamiento restringido, velocidad 5 mm/s

$$E_{V5} = 0,1948MPa$$

- Velocidad baja: 0,83 mm/s
 Probeta 11:

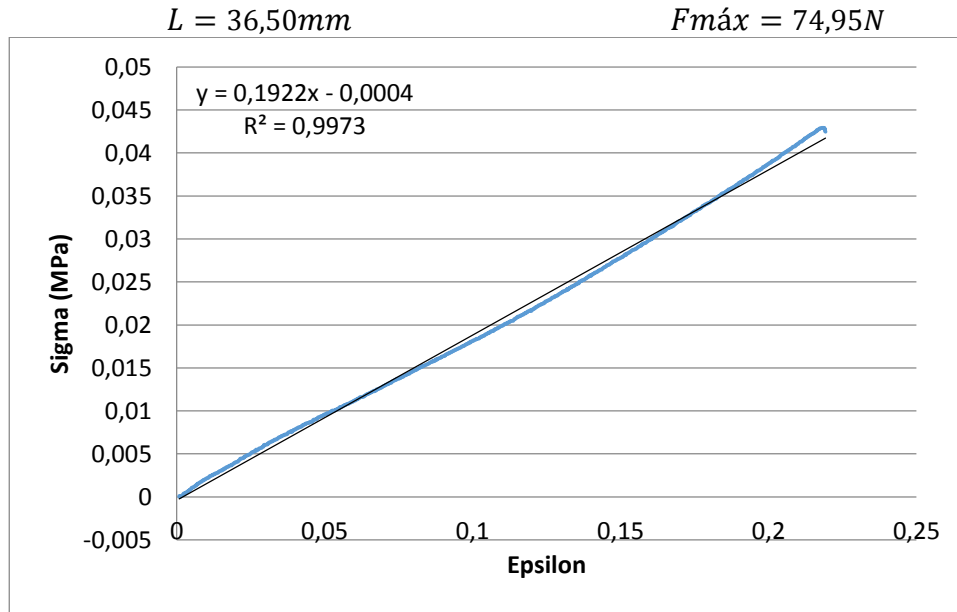


Figura 5.7 Curva σ - ϵ , probeta 11. desplazamiento restringido, velocidad 0.83 mm/s

4.6 Resumen de resultados

Tabla 5-2 Resumen de resultados ensayo de compresión sobre el núcleo.

Módulo elástico	$V = 5mm/s$	$V = 0,83mm/s$
Libre	0.1107 ± 0.0004	0.111 ± 0.003
Restringido	0.199 ± 0.005	0.199 ± 0.006

5 Ensayos de impacto

5.1 Objetivo

Los ensayos de impacto realizados sobre el núcleo tienen como objetivo determinar el módulo elástico del material a diferentes velocidades.

5.2 Fundamento

El módulo de elasticidad E_x se obtiene mediante la Ley de Hooke y los valores de las deformaciones ϵ_x que se calculan a partir del desplazamiento que se produzca en el ensayo. E_x es la pendiente de la gráfica tensión-deformación, donde σ_x es la tensión.

$$\sigma_x = E_x \cdot \epsilon_x \quad (5.4)$$

El ensayo se ha realizado a tres velocidades de impacto distintas.

A pesar de tratarse el impacto de un fenómeno dinámico y altamente no lineal, se ha intentado ajustar a una recta el comienzo de las curvas tensión-deformación obtenidas a partir de las curvas fuerza-tiempo registradas durante los ensayos.

5.3 Maquinaria

La máquina utilizada es la CEAST 9350 Droptower Impact System de la empresa INSTRON CEAST 9350 en una máquina de pruebas para impactos sobre placas, películas y piezas tridimensionales que cumple con las normas (ITW Test and Instrument Italia S.r.l-INSTRON CEAST Division, 2014):

ISO 179-2, ISO 180, ISO 3127 , ISO 6603-1 , ISO 6603-2 , ISO 7765-2 , ASTM D 256 , ASTM D 2444, ASTM D 3763 , ASTM D 5628 , ASTM D 6110 , ASTM D7136 , ASTM D7192 , ASTM E23 , PR - EN6038 , 1.0010andother AIRBUSAITM y normas equivalentes.

CEAST 9350 está diseñada de forma modular, esto permite la adición y conexión de otros instrumentos de forma posterior.

5.3.1 Elementos que componen la CEAST 9350

El equipo está formado por las siguientes partes:

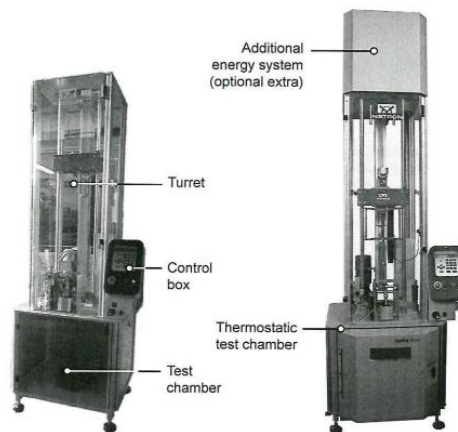


Figura 5.8 Partes de CEAST 9350 (ITW Test and Instrument Italia S.r.l-INSTRON CEAST Division, 2014)

Turret. Torreta es la parte superior del instrumento, fijado a la cámara de ensayo por medio de tornillos. Dentro de la torreta están alojados:

- Automatic Tup recovery/releasing system: Sistema de elevación que mueve el dardo hasta la altura correcta y lo libera para la realización del impacto..
- Additional energy system: Sistema de muelles utilizados para incrementar la velocidad del impacto hasta 24 m/s (con una masa de 2 kg) o hasta 7 m/s (con una masa de 70kg). Se puede llegar a obtener una energía máxima de 1800J
- Tup: dardo de impacto, superficie que entra en contacto con la muestra. El dardo cuenta con un sensor que proporciona datos sobre el contacto que se produce durante el impacto.
- Tup holder: elemento que permite la colocación de masa extra (en forma de pesas) para la realización del impacto, existen de varios tipos en función del rango de masa que queramos añadir. Está situado entre el dardo y el sistema de elevación.
- Tup anti rebound system: Sistema anti-rebote opcional que se lanza después de que se produzca el impacto, impidiendo que el dardo rebote contra la muestra nuevamente. Este sistema limita las dimensiones del dardo a 120x180mm.

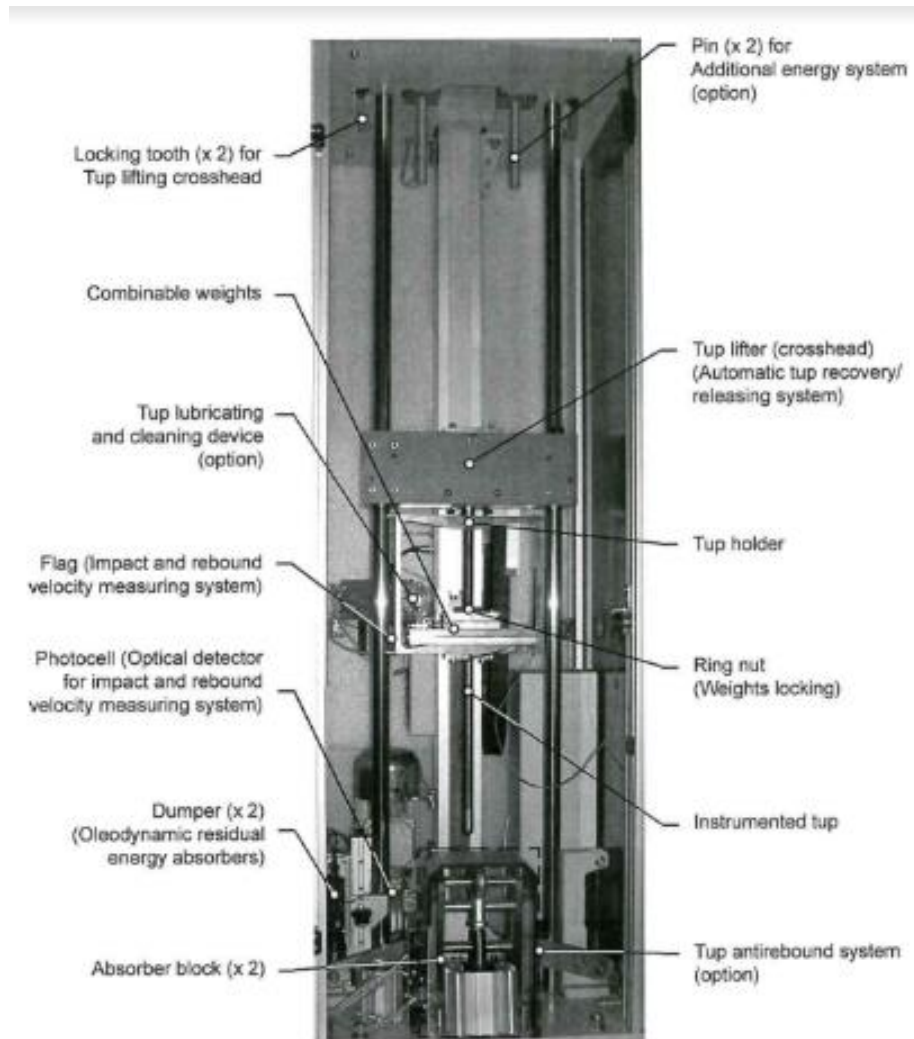


Figura 5.9 Elementos de la torreta (ITW Test and Instrument Italia S.r.l-INSTRON CEAST Division, 2014).

- Impact and rebound velocity optical detector: Sensor óptico utilizado para medir la velocidad del dardo justo antes de realizar el impacto, activa el sistema anti-rebote. El sensor está formado por una fotocélula fijada a un soporte cuya altura se debe ajustar en cada ensayo distinto. La fotocélula se activa cuando la bandera situada en el soporte del dardo provoca la interrupción de los rayos de luz dos veces de forma consecutiva.

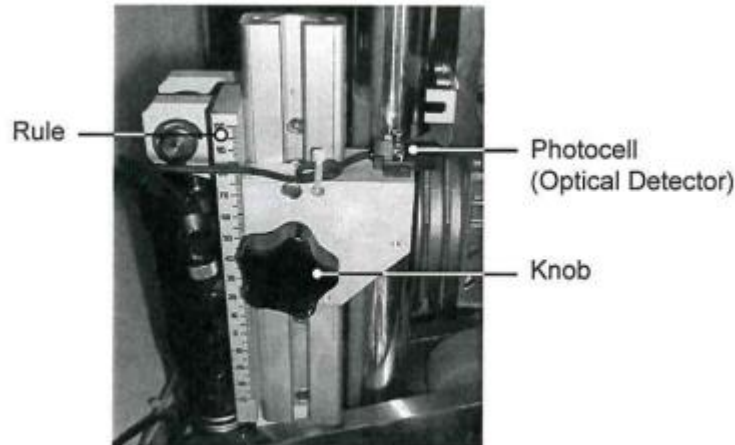


Figura 5.10 Detector óptico (ITW Test and Instrument Italia S.r.l-INSTRON CEAST Division, 2014).

- Residual energy absorbers: Sistema de amortiguación de la energía residual después del impacto. Se encuentran en la base de la torreta situado a ambos lados.

Thermostatic test chamber. Cámara de prueba termostática.

Permite realizar ensayos en un rango de temperaturas comprendido entre los -70°C y los 150°C . Puede alcanzar temperaturas tan bajas gracias la expansión de nitrógeno líquido aportado por una fuente externa. En su interior se encuentran los siguientes sistemas:

- Clamping. Sistema de sujeción automática, capaz de alcanzar hasta 3kN.
- La cámara cuenta en su interior con un sistema que permite colocar la muestra a la altura deseada, con el mismo fin existen diferentes tipos de plato soporte para ajustar de forma adecuada la probeta de ensayo.

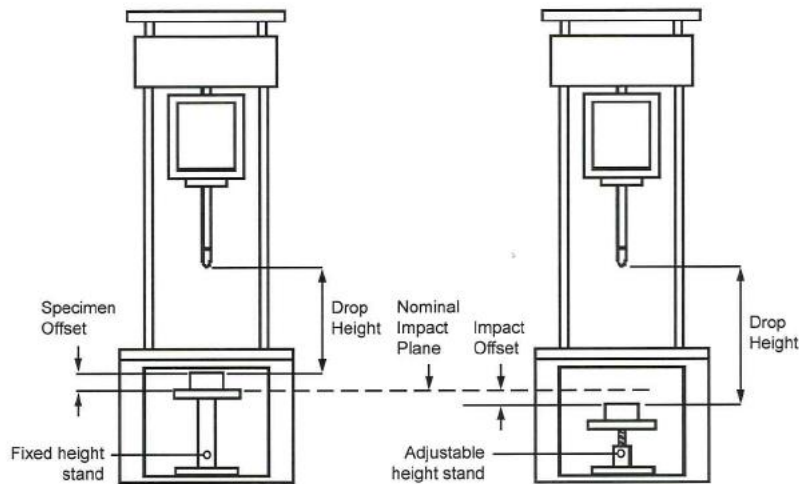
Control box. Caja de control, es la caja unida a la parte derecha de la torreta y está provisto de la las siguientes partes:

- Encendido / apagado: son pulsadores para conectar y desconectar la alimentación del instrumento.
- Emergencia: se utiliza sólo cuando se produce una situación de emergencia. Cuando se pulsa este botón se corta la energía eléctrica.
- Teclado alfanumérico con display LCD: se utiliza para programar y gestionar los ensayos. La memoria del instrumento es capaz de almacenar hasta 25 conjuntos de parámetros de prueba.

5.3.2 Parámetros límite de la CEAST 9350

Tabla 5-3 Parámetros límite CEAST 9350 (ITW Test and Instrument Italia S.r.l-INSTRON CEAST Division, 2014)

Test Parameters	Measure Units	Input Format	Limits	
			Min.	Max.
Temperature	[°C]	+/-xx	-70	150
Mass	[kg]	xx.xx	1	71
Drop Height	[mm]	xxxxx	30	1100 (29360)*
Velocity	[m/s]	xx.xx	0,77	4.64 (24.00)*
Tup Length	[mm]	xxx	250	470
Specimen Offset	[mm]	xx.x	0	30
Impact Offset	[mm]	+/-xx	- 120	+ 100



Sketches referred to the previous steps: 3) Drop Height, 7) Specimen/Impact Offset

Figura 5.11 Distancias de trabajo (ITW Test and Instrument Italia S.r.l-INSTRON CEAST Division, 2014).

Tabla 5-4 Rangos de operación CEAST 9350 (ITW Test and Instrument Italia S.r.l-INSTRON CEAST Division, 2014)

OPERATIONAL RANGE	without additional Energy System	with additional Energy System
Mass [kg] *	2 to 5 (LH) 5 to 30 (SH) 5 to 70 (SHA)	
Drop height [m]	0.03 to 1.1	0.03 to 29.4 (equivalent, depending on the mass)
Speed [m/s]	0.77 to 4.65	0.77 to 24 (depending on the mass)
Energy [J] *	0.59 to 54 (LH) 1.5 to 324 (SH) 1.5 to 757 (SHA)	0.59 to 830 (LH) 1.5 to 1250 (SH) 1.5 to 1800 (SHA)
Temperature [°C]	-70 to 150 (for Thermostatic Chamber, depending on the accessories)	

(*) LH: Light Falling Mass; SH: Standard Falling Mass; SHA: SH with Additional Falling Mass

5.3.3 Software

El software utilizado es el CeastView

La configuración de un ensayo se compone de las siguientes partes:

Configuración de los parámetros del ensayo:

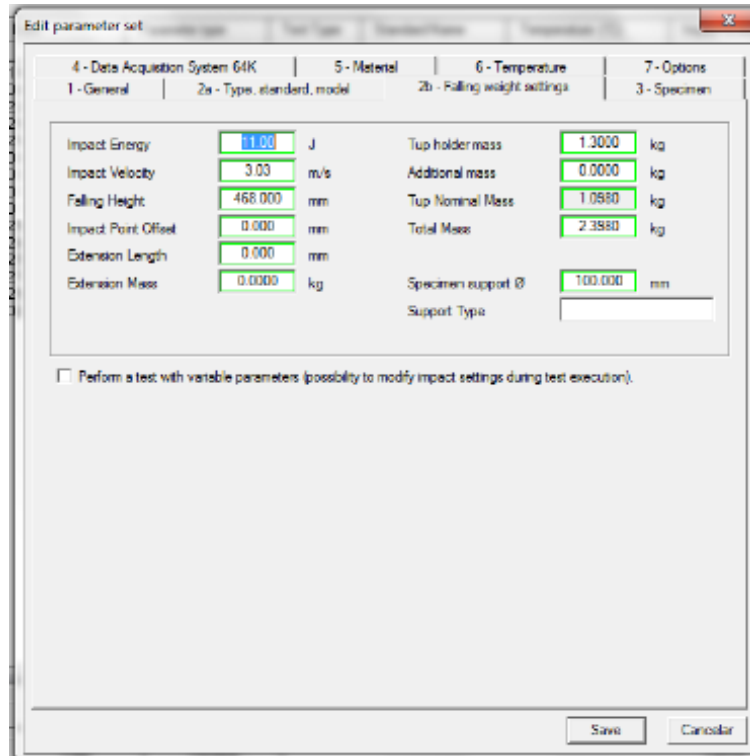


Figura 5.12 Configuración de los parámetros del ensayo.

Realización del ensayo:

- Se selecciona una configuración de parámetros.
- Se introduce un nombre.
- Se lanza el ensayo.
- Se verifica la posición de la fotocélula.
- Se recogen los datos del ensayo, se guardan y se representan de forma automática.
- Para repetir un ensayo con distintas muestras en las mismas condiciones, simplemente se pulsa el botón Next entre muestra y muestra, el propio software identifica que se trata de otra probeta y guarda los resultados identificando en número de la muestra.
- Para finalizar el ensayo se pulsa sobre el botón END.

Se recomienda bajar el dardo a la posición cero, y subir la muestra hasta dicha posición, para configurar el ensayo.

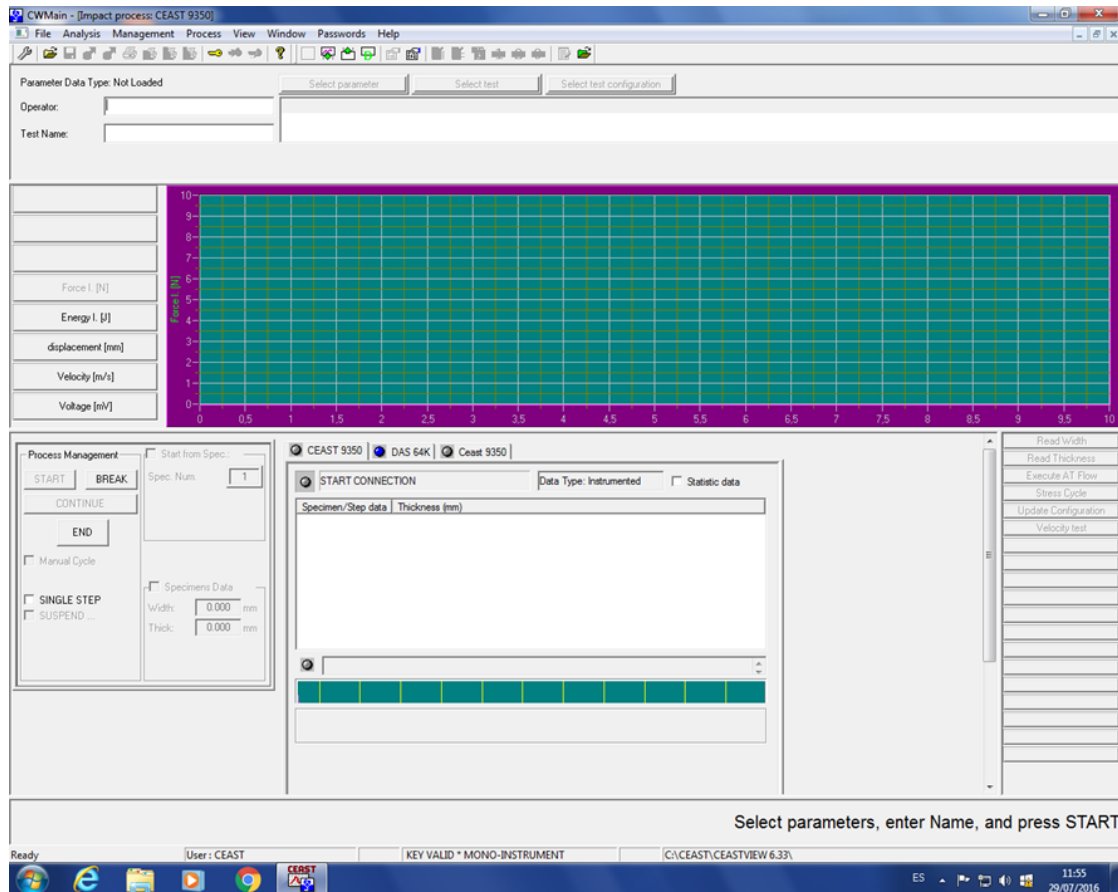


Figura 5.13 Pantalla de visualización del ensayo de impacto

5.4 Tratamiento de datos

Los datos obtenidos directamente del ensayo (ver figura 5.14) son: Fuerza (N) y tiempo (ms), a partir de estos valores el software calcula energía (J), desplazamiento (mm) y velocidad (m/s).

	A	B	C	D	E	F	G
1	[Espuma_3ms_17]						
2	[Specimen: 1]						
3	[Channel: 1]						
4							
5	[Calculated Data]						
6							
7	Point ID	Time [ms]	Force [N]	Energy [J]	Displacemer	Velocity [m/s]	Voltage Ch1 [mV]
8	1	0	0	0	0	2,93	1,008075
9	2	0,00025	1,171218	0	0,000733	2,930002	1,017315
10	3	0,0005	1,756828	0,000002	0,001465	2,930005	1,021934
11	4	0,00075	1,464023	0,000003	0,002198	2,930007	1,019624
12	5	0,001	1,464023	0,000004	0,00293	2,930009	1,019624

Figura 5.14 Datos obtenidos del ensayo de impacto para caracterización de los núcleos.

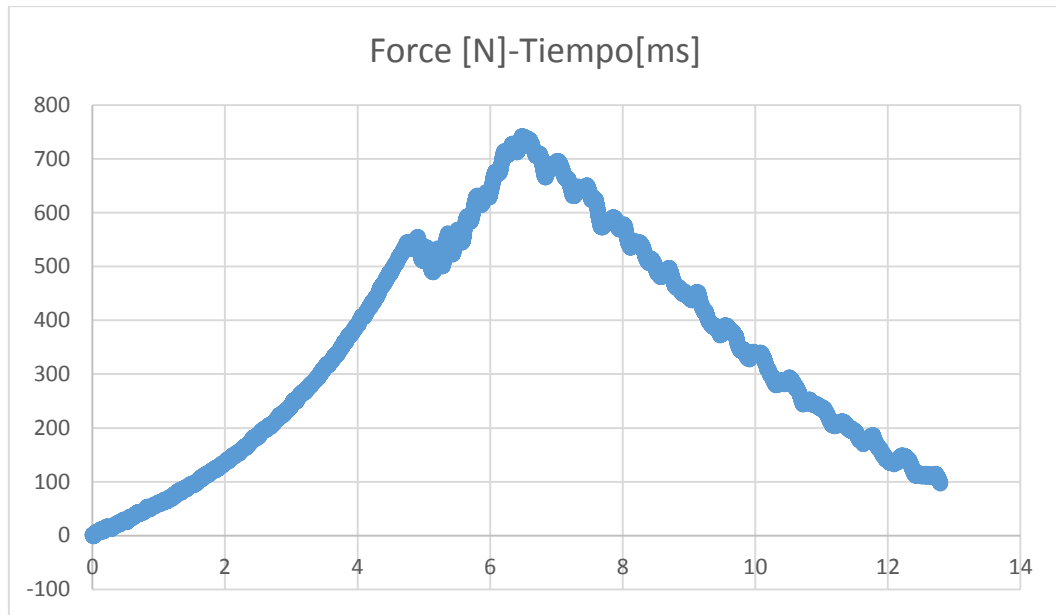


Figura 5.15 Curva Fuerza [N]-Tiempo [ms].

Conocidos estos datos, el área la sección A y espesor de la probeta L , se pueden obtener la deformación ε_x y la tensión σ

$$\varepsilon_x = \frac{\text{Posición}}{L} \quad (5.5)$$

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (5.6)$$

Siendo:

$$A = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \quad (5.7)$$

Donde D es el diámetro de la probeta.

5.5 Resultados

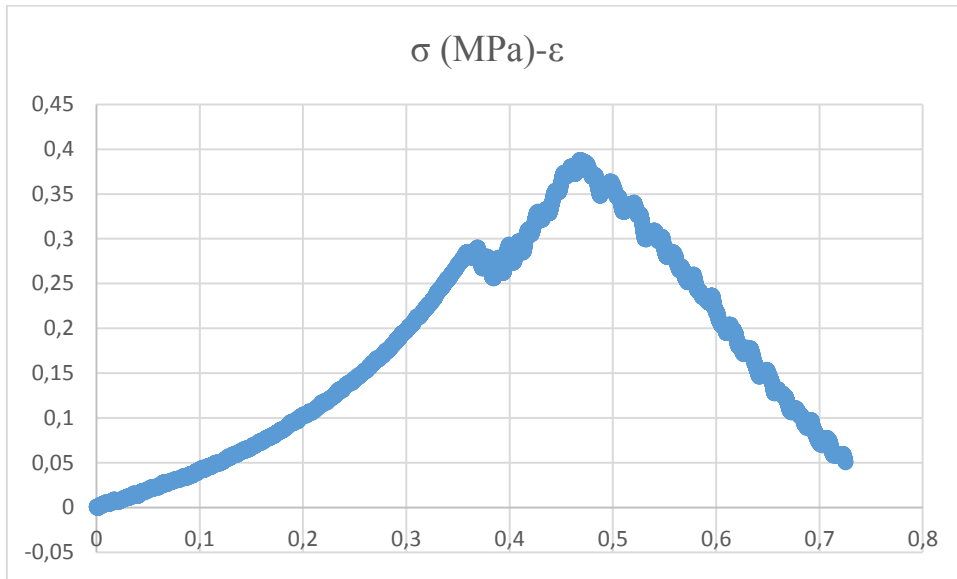


Figura 5.16 Curva σ - ϵ

Realizando un ajuste lineal de la primera zona de la curva de la figura 5.16 se obtiene el módulo elástico:

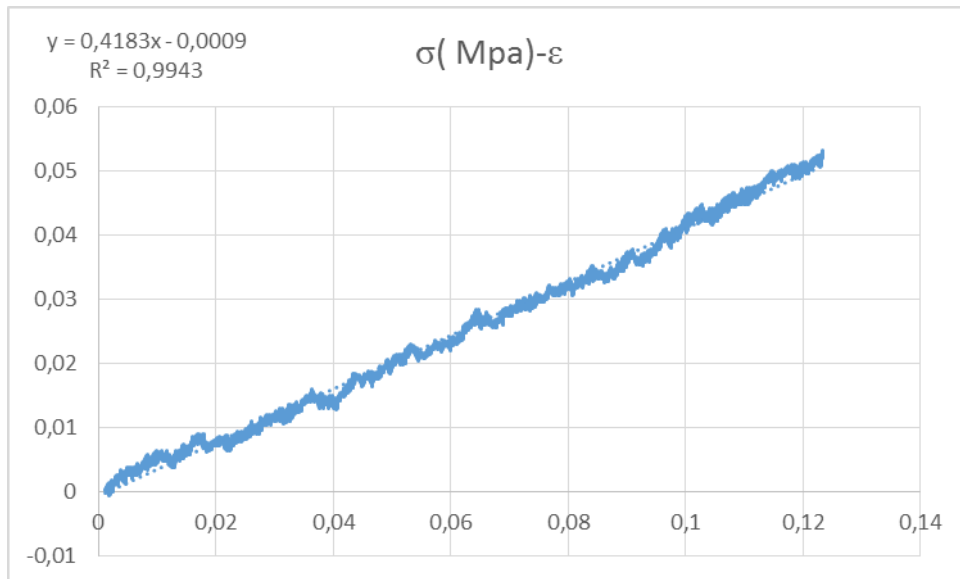


Figura 5.17 Primer tramo de la curva σ - ϵ

El módulo elástico de esta muestra a sometida a impacto a una velocidad de 3 m/s es de 0,4183 MPa

El ensayo se ha realizado a tres velocidades distintas y a cada velocidad se han realizado tres ensayos.

5.6 Resumen de resultados

Tabla 5-5 Resumen de resultados ensayos de impacto para caracterización del núcleo.

Velocidad	Nº Probetas	E_x (MPa)	E_x (MPa)
3m/s	17	0,4183	0,417 ± 0,008
	18	0,4246	
	19	0,4085	
4m/s	20	1,6000	1,59 ± 0,02
	21	1,5622	
	22	1,5970	
4,5ms	14	1,6584	1,6 ± 0,01
	15	1,6624	
	16	1,6800	

6 Conclusiones

De los ensayos realizados sobre el material que conforma el núcleo de la pala se puede observar su comportamiento visco-elástico. Es decir, el material presenta mayor rigidez cuando la aplicación de la carga se realiza a mayor velocidad.

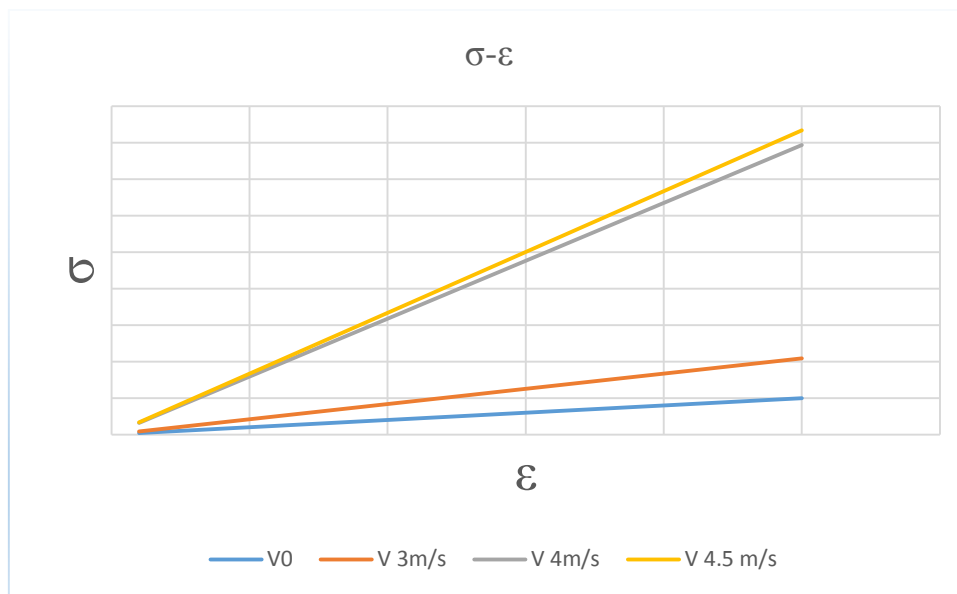


Figura 5.18 Comparación de la influencia de la velocidad de deformación sobre la rigidez del núcleo.

De los resultados del ensayo de compresión se puede observar como el módulo de elasticidad no varía entre una velocidad y otra, ya que estas son muy bajas. Del ensayo de compresión también se puede observar como el valor del módulo elástico se duplica en el ensayo con desplazamientos restringidos respecto al de desplazamientos libres.

Se puede observar que la mayor variación del módulo elástico se produce entre la velocidad de 3 m/s y la de 4 m/s.

El ensayo de impacto no se realizó con velocidades mayores porque estas hacían entrar en funcionamiento el sistema auxiliar de energía y este generaba problemas en el ensayo. Porque provocaba el choque de los utensilios empleados durante la prueba, no consiguiéndose un impacto limpio.

Capítulo 6 Definición de ensayo de control de calidad de las palas fabricadas.

1 Introducción

En este capítulo se desarrolla un control de calidad efectuado sobre las palas fabricadas. El control tiene como objetivo observar la repetitividad o no del comportamiento de la pala frente a una sollicitación de impacto. Para la realización de dicho control se ha creado un utillaje específico.

2 Definición del control de calidad

Tres palas Marvel sin agujeros (figura 6.1) serán sometidas a la misma prueba de impacto. Las palas serán sometidas a tres impactos por ambas caras en su parte central. La máquina de impactos utilizada es la CEA5T 9350 descrita en el capítulo 5.



Figura 6.1 Palas de ensayo.

Las condiciones del ensayo son las siguientes:

- Energía del impacto: 11J. Misma energía con la que se ensayó la espuma y se realiza la simulación del impacto en el capítulo 8.
- Masa del impactor:

Tabla 6-1 Masa del impactor.

Elemento	Masa (g)
Dardo + extensión	1035,0
Tup holder	1300,0
Masa extra	0,0
Arandela	2,8
Seta	60,2
Total	2398,0

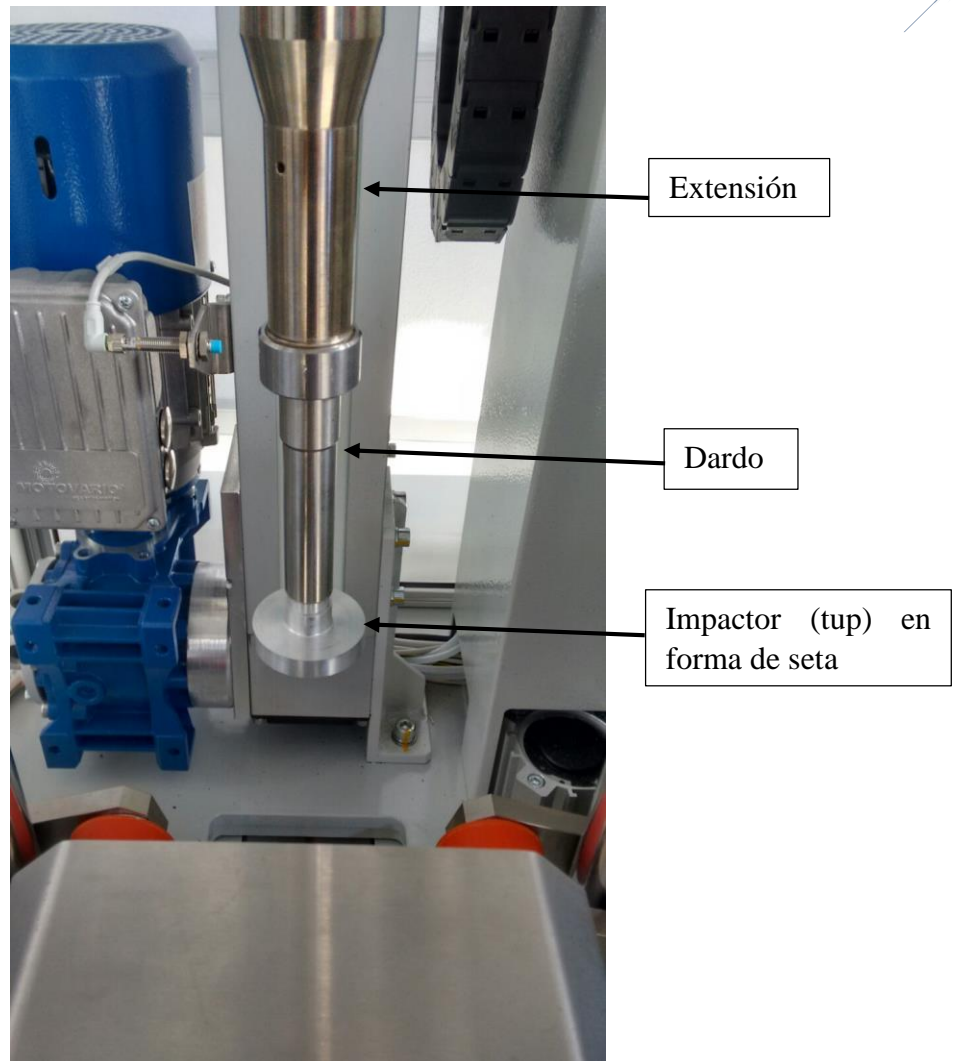


Figura 6.2 Elementos del impactador.

- Velocidad del impacto:

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2 \quad (6.1)$$

$$V = \sqrt{2 \cdot \frac{E}{m}} \quad (6.2)$$

Donde E es la energía del impacto, m la masa del impactador y V la velocidad del impacto.

$$V = \sqrt{2 \cdot \frac{11 J}{2,398 kg}} = 3,03 \frac{m}{s} \quad (6.3)$$

- Forma del impactor (tup): Forma de seta. Ver plano 01



Figura 6.3 Impactor en forma de "seta".

Se utilizó ese tipo de impactor para distribuir la fuerza de contacto entre una superficie mayor, porque no se tenía certeza de la resistencia de la pala.

- Presión ejercida por el pisador (clamping): 0,2 bar
- Utillaje de sujeción: Ver plano 01

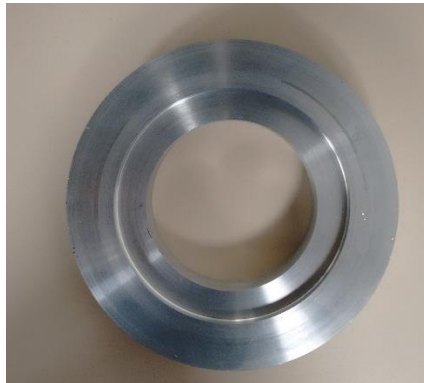


Figura 6.4 Utillaje de colocación.

3 Resultados

3.1 Comparación de impactos sobre misma cara

Cara A

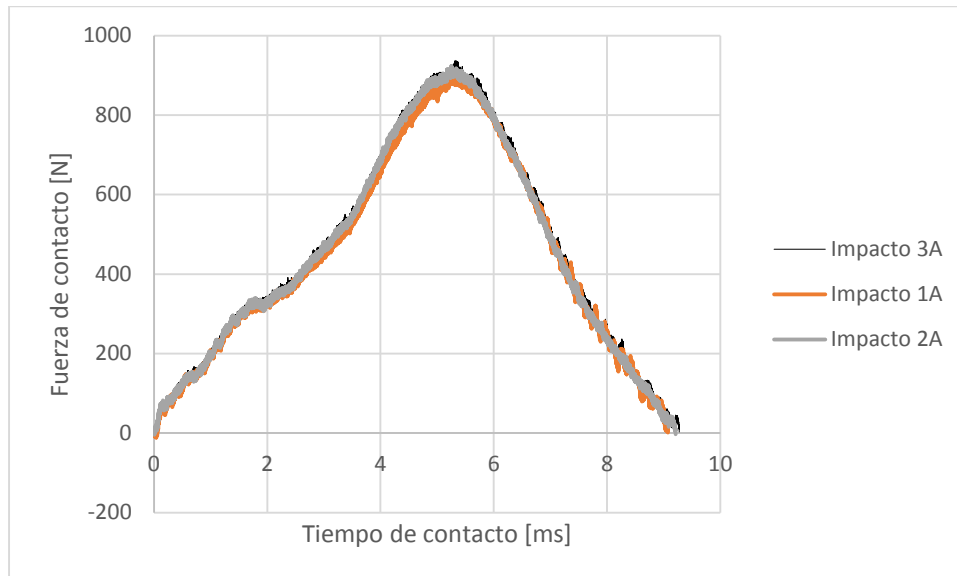


Figura 6.5 Comparación de impactos sobre cara A

Cara B

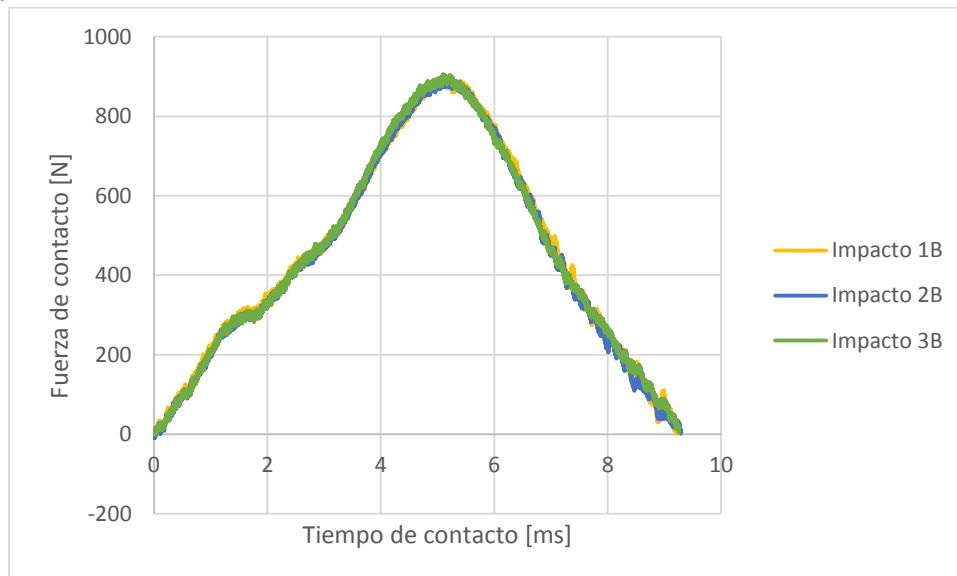


Figura 6.6 Comparación de impacto sobre cara B

3.2 Comparación de impactos sobre la misma pala, pero por caras distintas

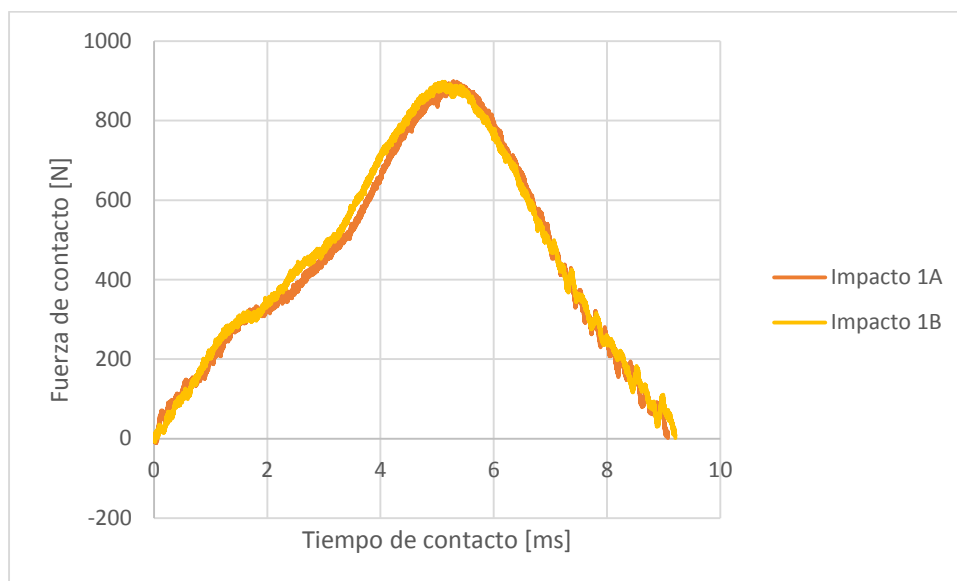


Figura 6.7 Comparación de impactos sobre la misma pala, caras distintas.

3.3 Comparación de impacto entre las tres palas

Para cada pala se ha tomado como referencia el impacto que ha alcanzado mayor fuerza de contacto.

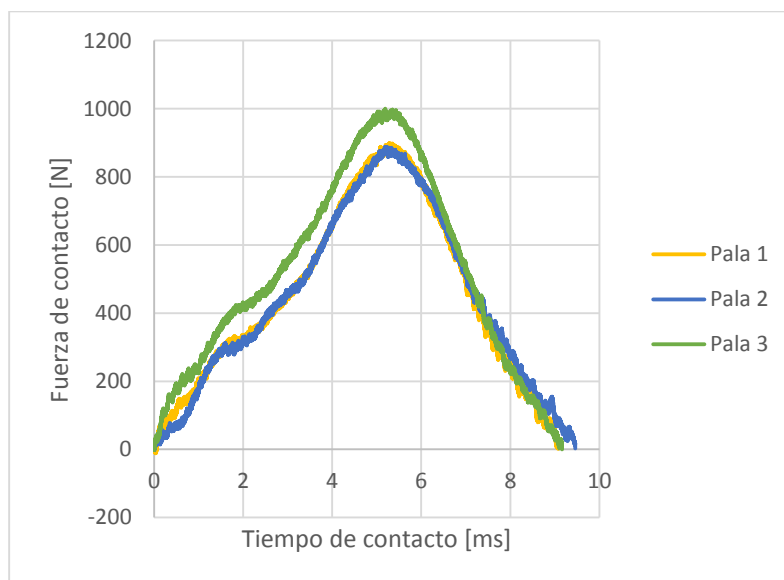


Figura 6.8 Comparación de impacto entre las tres palas.

3.4 Resumen

Tabla 6-2 Resumen de resultados impactos sobre palas.

Pala 1	Cara A	Cara B	Variación
Fuerza (N)	920 ± 19	899 ± 5	2,26%
Tiempo de contacto (ms)	9,19 ± 0,10	9,25 ± 0,04	0,67%
Pala 2	Cara A	Cara B	Variación
Fuerza (N)	868 ± 14	873 ± 15	0,54%
Tiempo de contacto (ms)	9,35 ± 0,06	9,43 ± 0,03	0,88%
Pala 3	Cara A	Cara B	Variación
Fuerza (N)	977 ± 16	997 ± 4	2,04%
Tiempo de contacto (ms)	9,02 ± 0,13	9,09 ± 0,02	0,68%
Valores máximos alcanzados			Variación
Fuerza máx.(N)	1000		14,80%
Fuerza mínima (N)	852		
Tiempo contacto máx. (ms)	9,46		5,88%
Tiempo contacto min. (ms)	8,90		

4 Conclusiones y líneas futuras.

Atendiendo a los resultados obtenidos, se puede concluir que:

- El ensayo es muy repetitivo tratándose de la misma cara de la misma pala.
- No existe diferencia de comportamiento entre una cara y otra de la misma pala. Esto puede ser indicativo de que el proceso de fabricación se realiza de forma idéntica en las ambas caras. Este comportamiento idéntico es un factor importante desde el punto de vista del jugador., al que le interesa que la pala se comporte de la misma forma independientemente de la cara con la que golpeé la bola.
- Si existe diferencia de comportamiento entre unas palas y otras. Esto se puede deber a una variación de la rigidez de la pala, la cual depende de los materiales empleados, la proporción de estos y el proceso de fabricación. Es importante para la empresa que los productos que oferte presenten las mismas prestaciones dentro de una categoría concreta, siendo esto garantía de calidad para el cliente.

Sería interesante realizar ensayos similares sobre tipologías de pala distinta:

- Comparar distinto comportamiento de las palas fabricadas con fibra de vidrio y fibra de carbono
- Estudiar la influencia de los agujeros. Número, tamaño y disposición de estos.
- Estudiar la influencia de la forma de la pala (redonda, lágrima, diamante).

Capítulo 7 Puesta a punto de técnica de simulación de impacto.

1 Introducción

Este capítulo es la continuación de los trabajos de fin de grado de Pablo Antonio Mesa Castro, “Simulación de impacto de baja energía mediante el método de los elementos finitos” (Mesa Castro, 2014) y de Ismael Burgos de la Rosa, “*Simulación de impacto sobre materiales compuestos laminados*” (Burgos de la Rosa, 2015). Se trata de una recopilación de sus trabajos adaptada a este y complementada con nueva información. Se trata de trabajos dirigidos por el mi tutor, Dr. D. Germán Castillo López y mi cotutor Dr. D. Felipe García Sánchez siguiendo la misma línea de investigación sobre correlación numérico-experimental de problemas de impacto no lineal en sistemas multimateriales.

1.1 Objetivo del capítulo.

Este capítulo pretende ser una guía básica de cómo realizar una simulación o modelización numérica de fenómenos de impacto de baja energía con el software Patran-Nastran y LS-PrePost (LS-Dyna). Se desarrollan en él solo los conceptos teóricos básicos y necesarios para poder comprender la simulación realizada en el capítulo 8. De esta forma los objetivos concretos de este capítulo son:

- Justificar el uso de Patran-Nastran y LS-PrePost en este trabajo fin de grado.
- Sentar la base para las justificaciones de las decisiones tomadas en las simulaciones realizadas en el capítulo 8.
- Facilitar al estudiante que decida proseguir con esta línea de investigación la instrucción en el software elegido para realizar las simulaciones.

1.2 Elementos finitos y cálculo no lineal.

El objetivo que el método de los elementos finitos, en adelante MEF, pretende cumplir no es otro que el de encontrar la solución a un problema de relativa complejidad, considerando este cómo la composición de varios problemas más sencillos. De esta manera se deja atrás la resolución completa y exacta del problema de estudio, generalmente gobernado por un sistema de ecuaciones diferenciales, para obtener una solución con un alto grado de precisión (el cuál vendrá determinado por la situación) a través de la discretización.

Dentro del ámbito de las matemáticas, se denomina sistema no lineal a aquel cuyo comportamiento no puede obtenerse como suma de los comportamientos de las funciones que lo componen. O dicho de otra manera, si dado un sistema, este está compuesto en su totalidad por funciones lineales, diremos que es un sistema lineal, y en dicho caso, el comportamiento de tal sistema podrá obtenerse como suma de los comportamientos individuales de cada una de las funciones lineales que lo componen.

En términos algebraicos, una función lineal es aquella que verifica las propiedades:

$$f(x + y) = f(x) + f(y) \quad (7.1)$$

$$f(k \cdot x) = k \cdot f(x) \quad (7.2)$$

El cumplimiento de ambas reglas se conoce como principio de superposición, por lo que se concluye que un sistema no lineal es todo aquél en el cuál, el principio de superposición no es aplicable.

Hipótesis de comportamiento de un sistema lineal:

Comportamiento lineal: evolución lineal de la carga (f) con respecto al desplazamiento (u). Es decir, la rigidez o factor de proporcionalidad (k) permanece constante.

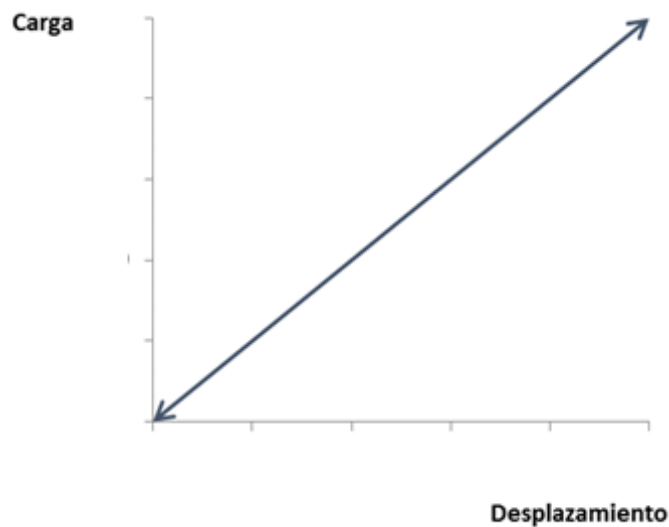


Figura 7.1 Comportamiento lineal y elástico.

Comportamiento elástico: la curva de comportamiento debe ser la misma tanto para el caso de carga cómo el de descarga.

Presentar pequeñas deformaciones/desplazamientos: los desplazamientos deben ser los suficientemente pequeños para que las ecuaciones de equilibrio puedan plantearse sin que se cometan errores apreciables. Por otro lado, las deformaciones (derivadas de los desplazamientos) son despreciables respecto de la unidad, y los productos de estas derivadas serán por tanto despreciables frente a las propias derivadas, lo que permite expresar las deformaciones como combinación lineal de las primeras derivadas de los desplazamientos.

Es evidente que la probabilidad de que los fenómenos de impacto presente no linealidades es alta, y en gran medida se debe al contacto que se produce en el momento del impacto. Por otro lado, de forma general la energía cinética puesta en juego suele ser alta, y está al transformarse en energía de deformación puede dar lugar a grandes desplazamientos y cambios en la geometría importantes. Si a todo ello se incorpora el uso de materiales que por naturaleza

exhiben un comportamiento no lineal, resulta trivial, que un análisis clásico lineal no será lo suficientemente preciso como para evaluar las consecuencias que puedan llegar a producirse.

1.3 Discretización temporal. Métodos explícito e implícito.

Debido a que los impactos son problemas en régimen transitorio, estos requieren de una discretización temporal más allá de la típica malla (discretización espacial, que también es necesaria) de los elementos involucrados en el análisis. Así pues, este apartado abordará cómo se realiza las dos formas posibles de dicha discretización en el tiempo: implícita y explícita.

1.3.1 Método implícito

El uso de la discretización implícita es aconsejable para estudios en los cuales no se producen grandes aceleraciones (Báez Leva, 2014), como puede ser el estudio de una estructura sometido a cargas permanentes a lo largo del tiempo, o en el campo de conformación de metales por deformación plástica (prensado). En definitiva, para situaciones de cuasiequilibrio, donde cada instante puede ser considerado un problema de equilibrio y por tanto los intervalos de tiempo serán relativamente grandes.

Sea un instante actual t_n , el método implícito está basado en calcular las variables incógnitas x_{n+1} , planteando las ecuaciones dinámicas en el mismo instante incógnita, es decir, en t_{n+1} . El mayor inconveniente de este principio es que el sistema de ecuaciones a resolver es un sistema de ecuaciones ligado o dependiente, con lo que requiere de un proceso iterativo para su resolución. Y para llevarlo a cabo, cómo se indica en (Goicolea, 2012-2013) y (MSC Software Corporation, 2012) el método más usual y el más extendido en el análisis dinámico de mecánica de sólidos es el método de β – Newmark para integrar numéricamente:

$$a_{n+\gamma} = (1 - \gamma) \cdot a_n + \gamma \cdot a_{n+1} \quad 0 \leq \gamma \leq 1 \quad (7.3)$$

$$v_{n+1} = v_n + a_{n+\gamma} \cdot \Delta t \quad (7.4)$$

Dónde:

a_i = aceleración en el instante i .

v_i = velocidad en el instante i .

Δt = incremento de tiempo.

γ = constante numérica.

Y el desplazamiento se obtiene:

$$a_{n+\gamma} = (1 - 2\beta) \cdot a_n + 2\beta \cdot a_{n+1} \quad 0 \leq 2\beta \leq 1 \quad (7.5)$$

$$u_{n+1} = u_n + v_n \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \cdot a_{n+\gamma} \cdot (\Delta t)^2 \quad (7.6)$$

Dónde:

u_i = desplazamiento en el instante i .

β = constante numérica.

Newmark demostró que valores estables para las constantes γ y β son $\gamma = 1/2$ y $\beta = 1/4$, lo cual hace igual el valor de la aceleración en los dos casos e implica también la consideración de que la aceleración media se conserva en todo el intervalo de tiempo.

Así este método resulta en lo siguiente (ANSYS, 2012) (Goicolea, 2012-2013) (Báez Leva, 2014):

Régimen lineal: A causa de que el método implícito propone un algoritmo de resolución de alta complejidad, la estabilidad para los casos lineales está garantizada, lo que permite el empleo de menores pasos de tiempo. No obstante, para problemas de grandes dimensiones, el coste computacional puede resultar inadmisibile debido al gran número de matrices que debe almacenarse para la resolución de los sistemas de ecuaciones.

Régimen no lineal: Como se mencionó anteriormente, el método implícito requiere de un método iterativo para cada paso de tiempo, que generalmente será de linealización (métodos de Newton – Raphson), lo cual resulta en un mayor coste computacional. Además, la inversión de la matriz de rigidez, al ser esta no lineal, ya no resulta trivial. Por otro lado, la convergencia del método no está garantizada aunque se disminuya el incremento temporal.

1.3.2 Método explícito

Al contrario que el método implícito, la forma explícita es aconsejable para situaciones donde se produzcan grandes aceleraciones y el tiempo de análisis sea relativamente pequeño, ya que como se verá más adelante, se requiere que el paso de tiempo no supere un valor crítico. El ejemplo más cercano de aplicación es el que aborda este TFG, impactos; el método explícito también encuentra aplicación incluso en el estudio de explosiones, en general en cualquier análisis de un problema transitorio de corta duración dónde la propagación de las ondas de tensión es de gran importancia.

Cómo se indica en su propio nombre, a diferencia del método implícito, el explícito busca la solución de las variables incógnitas x , estableciendo las ecuaciones dinámicas en el instante anterior, t_n . El algoritmo de resolución empleado se basa en el esquema de diferencias centrales, de forma que, la posición, fuerzas y aceleraciones se definen en el instante t_n , y por su parte las velocidades se definen en el instante $t_{n+\frac{1}{2}}$, de forma que si representamos el avance sobre la línea de tiempo se obtiene (Goicolea, 2012-2013) (MSC Software Corporation, 2012):

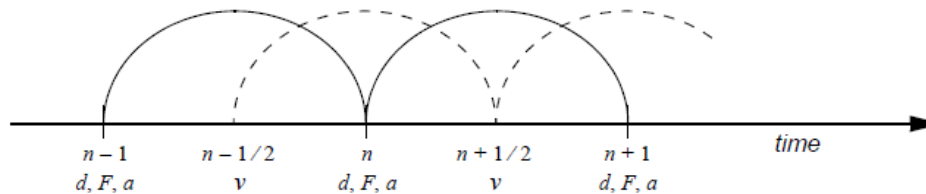


Figura 7.2 Algoritmo de resolución explícito (MSC Software Corporation, 2012)

$$v_{n+\frac{1}{2}} = v_{n-\frac{1}{2}} + a_n \cdot \frac{(\Delta t_{n+\frac{1}{2}} + \Delta t_{n-\frac{1}{2}})}{2} \Rightarrow v_{n+\frac{1}{2}} = v_{n-\frac{1}{2}} + a_n \cdot \Delta t \quad (7.7)$$

$$u_{n+1} = u_n + v_{n+\frac{1}{2}} \cdot \Delta t_{n+\frac{1}{2}} \Rightarrow u_{n+1} = u_n + v_{n+\frac{1}{2}} \cdot \Delta t \quad (7.8)$$

Siguiendo con un planteamiento de masas concentradas cómo propone (Goicolea, 2012-2013), se obtiene el siguiente planteamiento matricial definiendo la aceleración en un instante cualquiera n (MSC Software Corporation , 2012):

$$[M] \cdot \{a_n\} = \{F_n^{ext}\} - \{F_n^{int}\} \Rightarrow \{a_n\} = [M]^{-1} \cdot F_n^{residual} \quad (7.9)$$

Dónde:

$[M]$ = matriz de masa.

$\{F_n^{ext}\}$ = vector de cargas externas.

$\{F_n^{int}\}$ = vector de fuerzas internas.

Y como consecuencia de estar basado en un esquema de masas concentradas, la matriz de masas resulta diagonal, por lo que su inversión es trivial (MSC Software Corporation , 2012) y el cálculo de velocidades y desplazamientos se realiza como se expuso anteriormente mediante el esquema de diferencias centrales, resolviendo el algoritmo elemento a elemento, por lo que no se requiere el almacenamiento de matrices que conllevaba el método implícito, y por tanto el coste computacional no sufre incrementos bruscos conforme aumenta la complejidad del problema (Goicolea, 2012-2013)

Cómo desventaja, se encuentra que para que el método sea estable está supeditado a la condición o criterio de Courant (Goicolea, 2012-2013) (MSC Software Corporation , 2012):

$$\Delta t < \Delta t_{crit} = \frac{L}{c} = \frac{2}{\omega_{máx}} \quad (7.10)$$

Dónde:

L = longitud del elemento.

c = velocidad del sonido en el material.

$\omega_{máx}$ = la frecuencia propia máxima del sistema

Dónde Δt_{crit} , es el tiempo mínimo para que la onda de tensión recorra el elemento. Así pues, el método explícito requiere de calcular un gran número de pasos de tiempo, pero que comparados con la forma implícita, son de pequeña complejidad y tampoco requiere de iteraciones que controlen los valores residuales, sino que el salto de tiempo se produce de forma continua como se muestra en la figura 7.3.

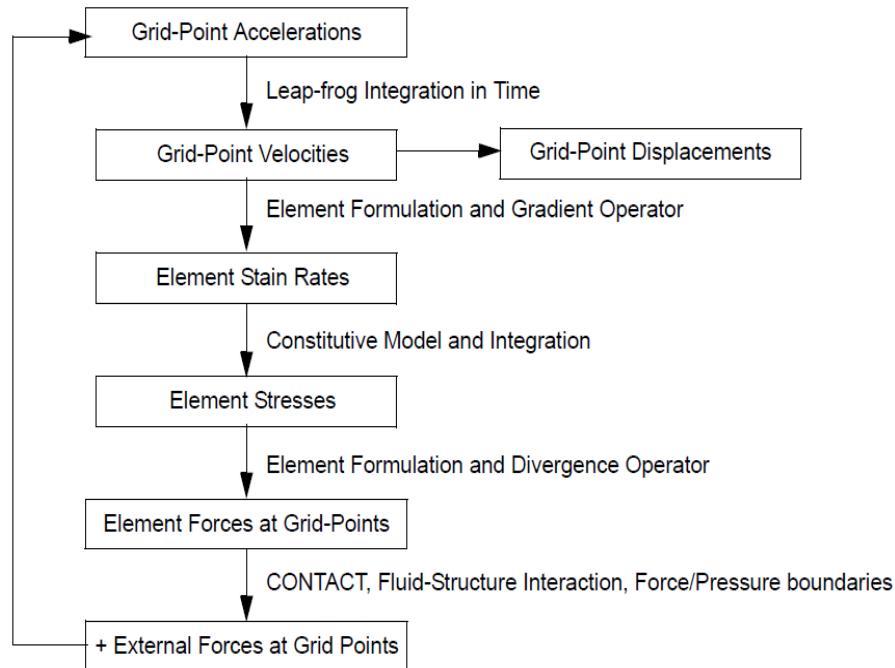


Figura 7.3 Algoritmo de resolución explícito 2 (MSC Software Corporation , 2012)

Por otro lado, esta condición, dado el elevado número de pasos de tiempo, obliga a que el tiempo de estudio, sea pequeño comparado con el método implícito.

Finalmente, se detallan a continuación a modo de resumen las características más significativas del método (Báez Leva, 2014) (Goicolea, 2012-2013) (MSC Software Corporation, 2011) (MSC Software Corporation , 2012):

- Se emplean métodos de masas concentradas, lo que resulta una matriz de masas diagonal, cuya inversión es trivial.
- A diferencia del método implícito, no recurre a procesos iterativos, característica que lo convierte en un método rápido y sencillo.
- No requiere la inversión de la matriz de rigidez, pues todas las no linealidades están incluidas en el vector de fuerzas internas, incluso las correspondientes al contacto.
- Puesto que las ecuaciones planteadas explícitamente no están ligadas, estas pueden resolverse de manera independiente, garantizando así la convergencia del método.
- La estabilidad del método está condicionada por la condición de Courant.

1.3.3 Situaciones en las que se debe emplear el método explícito

Cómo se ha mencionado anteriormente, el hecho de que el método explícito requiera calcular numerosos pasos de tiempo de pequeña amplitud, lleva consigo como requisito que el tiempo de estudio sea corto. Al contrario que ocurría con el método implícito. Además, se deberá elegir el método explícito cuando los fenómenos de propagación de las ondas de tensión resulten de gran importancia. Por tanto, en general, si por alguna causa, el tamaño del paso de tiempo debe ser pequeño comparado con la forma implícita, se recurrirá al análisis explícito. Como idea general, esto puede ocurrir para problemas que presenten (MSC Software Corporation , 2012)

- No linealidad debida al material.
- Interacción de contacto, con o sin rozamiento, ya que las inestabilidades que pudieran llegar a aparecer debidos a los algoritmos de resolución, requerirán de pequeños pasos de tiempos para garantizar una cierta precisión.

En general, según aumenta el tamaño del modelo y el número de no linealidades, el método explícito tiende a ser más rentable que el método implícito, ya que como se vio anteriormente, el coste computacional crece de forma lineal en la forma explícita (ver figuras 7.4 7.5).

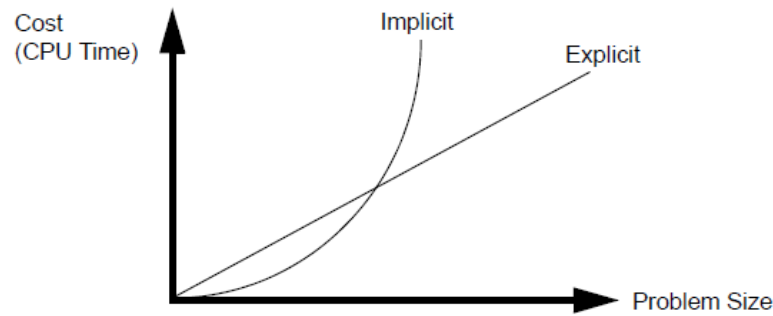


Figura 7.4 Aumento del coste computacional (ordenadas) con respecto al tamaño del problema (abscisas) (MSC Software Corporation , 2012)

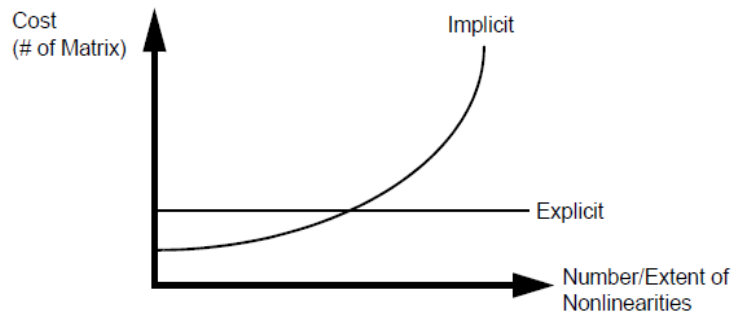


Figura 7.5 Aumento del coste matricial (ordenadas) con respecto al tamaño del problema (abscisas) (MSC Software Corporation , 2012)

1.4 Modos de hourglass o de energía nula.

Se definen los modos de hourglass como modos de deformación, originados por el uso de elementos de integración reducida, según los cuales, el elemento se deformaría sin que su volumen se modificara ya que dicho modo no conlleva asociada rigidez a la deformación alguna (ver figura 7.6) (Beltrán, 1998-1999) (MSC Software Corporation , 2012) Se trata por tanto de un fenómeno no físico e imposible en la naturaleza, donde todo estado de deformación, está acompañado de un estado tensional, ligados ambos a través de los parámetros de rigidez.

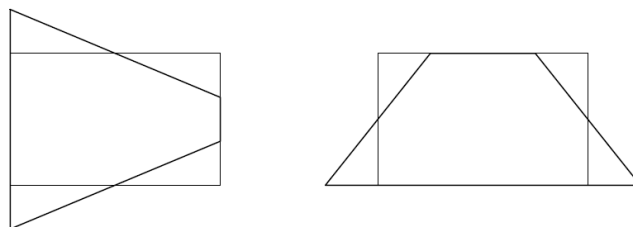


Figura 7.6 Modos de hourglass de un elemento tipo shell.

En caso de no controlar la aparición de estos modos, el fenómeno se extendería por toda la malla generando un análisis inexacto, en adición, estos modos pueden hacer que el paso de tiempo se reduzca, y en caso de alguna dimensión del elemento se haga cero, el análisis se abortaría en última instancia (MSC Software Corporation , 2012).

Se obtiene la conclusión de que, como es habitual en el mundo de la ingeniería, se requiere llegar a situaciones de equilibrio o de compromiso de forma que sin renunciar a las ventajas de un método de cálculo como el explícito, se puedan evitar los problemas generados por los fenómenos de hourglass. Así, se determina por convenio que, los resultados de un análisis no serán aceptados, cuando la energía de hourglass supere el 10% de la energía interna del modelo.

2 Justificación del uso de Patran-Nastran Sol 700 (LS-Dyna)

El software de elementos finitos empleado en este TFG se denomina Patran/Nastran, que fue desarrollado inicialmente por la NASA alrededor de los años 60. Dentro de este potente software existen varios módulos que abarcan el modelado numérico de distintos fenómenos, así el módulo que comprende las herramientas necesarias para realizar un análisis explícito en situaciones de impacto se denomina MSC. Nastran Explicit Nonlinear SOL 700 (en adelante SOL 700).

El módulo de resolución del modelo ó solver, SOL 700, está basado en el solver LS-Dyna, y utiliza el método explícito de resolución que permite obtener de forma estable y rápida soluciones para problemas dinámicos y/o de corta duración y con un alto grado de no linealidades (Doelfs, y otros, 2004). Originalmente LS-Dyna se denominó Dyna3D, y se creó como herramienta militar en el 1976 por John O. Hallquist. Tras su desarrollo, en 1978, el código se distribuyó libremente, pudiéndose incorporar a diferentes software comerciales de EF como Ansys o Nastran (Beltrán, 1998-1999). De esta forma se consigue ahorrar tiempo, al no tener que tratar con dos software (Nastran y LS-Dyna), y se evita el cometer errores por el desconocimiento de las diferencias entre ambos.

Los modelos numéricos, son implementados en Nastran en forma de un fichero de texto denominado MSC.Nastran Input file, el cual puede ser generado por cualquier editor de texto, no obstante, dada la gran cantidad de información que requiere la modelización (incluso para un modelo sencillo) numérica de elementos finito, este fichero será generado por un pre/post procesador, el cual ofrecerá al usuario una interfaz gráfica e intuitiva con múltiples herramientas para llevar a cabo la simulación requerida (Doelfs, y otros, 2004). Para este TFG, se ha escogido el pre-procesador Patran, el cual fue desarrollado por los creadores de Nastran como herramienta de conexión entre el usuario y Nastran, de forma que se garantiza una cierta facilidad de empleo de ambos softwares.

Para el post-procesado se ha utilizado LS-PrePost, porque su uso es más cómodo que Patran en problemas dinámicos ya que se encuentra especializado en ese campo.

Se decide utilizar este conjunto de herramientas de cálculo basadas en el MEF por varios motivos, en primer lugar por la potente capacidad que ofrece Nastran como módulo de resolución, siendo una de las mejores herramientas informáticas empleadas a nivel mundial. En segundo lugar, el hecho de contar con un pre/post procesador propio facilita el empleo del solver y acelera la obtención de un manejo necesario a la hora de realizar las modelizaciones requeridas. Y por último, por recomendación del tutor de este TFG.

3 Planteamiento general de un problema de elementos finitos y conceptos básicos.

3.1 Geometría

El primer paso en un problema de elementos finitos es la definición de la geometría de los cuerpos que van a formar parte del estudio. Aunque se podría realizar el análisis sin necesidad de crear la geometría, su uso facilita y agiliza el proceso. Porque sirve de base para definir el mallado y definir las condiciones de contorno.

3.2 Mallado

El mallado es el proceso por el que se dividen los cuerpos del estudio en diferentes elementos. Este se puede controlar para definir el tamaño y distribución de los elementos en el espacio.

3.3 Material

Es necesario definir el comportamiento del material. Nastran utiliza unas tarjetas (tablas) en las que recoge las propiedades del material y lo identifica. La creación de estas tarjetas se facilita con el uso del preprocesador Patran.

3.4 Definición del elemento

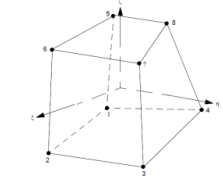
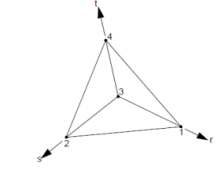
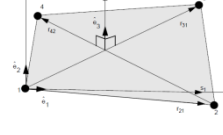
En Nastran, cada tipo de elemento posee cinco características que determinarán su comportamiento (MSC Software Corporation , 2012):

- **Clase:** viene determinada por el tipo de dominio geométrico que se quiere representar (algunos ejemplos son: elementos viga, elementos tridimensionales o sólidos 3D, masas concentradas,...).
- **Número de nodos:** número de puntos en los que se calcularán los desplazamientos. Se pueden diferenciar dos grandes tipos de elemento en función del número de nodos:
 - Elementos de primer orden: sólo tienen nodos en los vértices y utilizan interpolaciones lineales.
 - Elementos de segundo orden: incluyen nodos intermedios además de en los vértices y utilizan interpolaciones cuadráticas. Estos elementos no son aplicables en el SOL 700.
- **Forma de interpolación:** para calcular los desplazamientos en un punto interior del elemento a partir de los obtenidos en los nodos, Nastran dispone de tres tipos de interpolaciones: lineal, cuadrática o cúbica.
- **Grados de libertad:** número de incógnitas en cada nodo del elemento.
- **Método de integración:** para realizar la integración numérica que precisa el MEF puede realizarse de dos formas, de modo completo o reducido. En el caso de emplear la integración reducida, el número de puntos de integración será inferior, con lo que el análisis se realiza más rápidamente, pero en contraposición pueden aparecer problemas de “hourglassing” (ver apartado 1.4). Por defecto, todos los elementos de tipo sólido o shell en el SOL 700 son formulados con integración reducida.

El SOL 700 de Nastran presenta una gran variedad de elementos con los que realizar los modelos (MSC Software Corporation , 2012), algunos de ellos aparecen en la siguiente tabla:

Caracterización y simulación del comportamiento ante impacto de estructuras compuestas tipo sándwich. Propuesta metodológica para un caso real: Pala de Pádel

Tabla 7-1 Tipo de elementos SOL 700.

Elemento	Dimensión	Número de Nodos	Esquema gráfico
CHEXA8	3D	8	
CTETRA4	3D	4	
CQUAD4	2D	4	

El elemento utilizado en este TFG es el elemento tridimensional CHEXA8

Elemento tridimensional CHEXA8

Se trata de un elemento paralelepípedo empleado para modelizar elementos tridimensionales. El elemento se define mediante 8 nodos, los cuales poseen tan sólo 3 grados de libertad referentes a la traslación en las tres direcciones espaciales (ver figura 7.7). Debido a la integración reducida, pueden presentar problemas de hourglass.

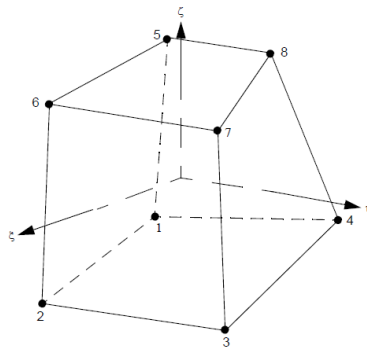


Figura 7.7 Elemento tridimensional CHEXA8

3.5 Condiciones de contorno

3.5.1 Desplazamientos

Se pueden restringir o imponer desplazamientos y giros a los elementos que conforman el estudio. La forma más adecuada de aplicarlos es sobre la geometría. Por ejemplo, al limitar a cero los desplazamientos y giros de la superficie de un sólido, todos los nodos que se encuentren referidos a esa cara tendrán restringidos sus desplazamientos, comportándose la superficie como un empotramiento.

3.5.2 Velocidad Inicial

Se puede establecer una velocidad lineal o de giro inicial sobre cada nodo. Esta condición de contorno es aplicable sobre nodos o sobre geometrías.

3.5.3 Fuerzas de inercia

En este estudio la fuerza de inercia se ha utilizado para simular la presencia de la gravedad. Las fuerzas de inercia son aplicadas sobre todo el conjunto de estudio, no se puede excluir a ningún cuerpo de su influencia.

3.5.4 Contactos

Es necesario definir los cuerpos que pueden contactar durante la simulación. También es necesario definir las parejas de cuerpos (puede tratarse del mismo cuerpo, sería una situación de auto-contacto) que pueden contactar entre ellas.

3.6 Control del paso del tiempo

Al realizar un estudio de una situación de impacto en MEF, no solo se divide el espacio (elementos) para llevar a cabo el cálculo, también se divide el tiempo. Estas subdivisiones de tiempo deben respetar la condición de Courant. Esta relaciona la velocidad de propagación de una onda en el sólido (esta depende de la densidad del material y de su rigidez) y la longitud menor del elemento menor del cuerpo de estudio, de manera que la subdivisión del espacio/tiempo sea la necesaria para captar la propagación de la onda. Ver apartado 1.3.2

4 Ejemplo de problema: Zabala

En este apartado se va a proceder a realizar un modelo numérico mediante el uso de Patran, Nastran y se analizarán los resultados obtenidos con LS-PrePost. Se va intentar reproducir el modelo correspondiente a la tesis “Influencia de la velocidad de impacto en la delaminación generada por impactos transversales de baja velocidad en tejidos carbono-epoxi. Dependencia del comportamiento interlaminar del composite a la velocidad de propagación de grieta” (Zabala Rodriguez, 2014).

En la tesis se realizan ensayos de impacto en un material laminado con refuerzo de tejido de fibra de carbono y matriz de resina epoxi (ver figura 7.8). Las probetas que se emplean en este caso son probetas circulares de diámetro 60 mm y empotradas en todo el perímetro. El espesor de la probeta es de 1,42 mm, formado por tres láminas, simétrico y con orientaciones a 0° , siendo el espesor de cada lámina igual a 0,23667 mm.

Se tiene un impactador de acero de cabeza esférica de radio 10 mm y una masa de 2 kg. En este caso se llevan a cabo tres tipos de ensayos de diferente nivel energético con el objeto de ver la respuesta que presentan las probetas.

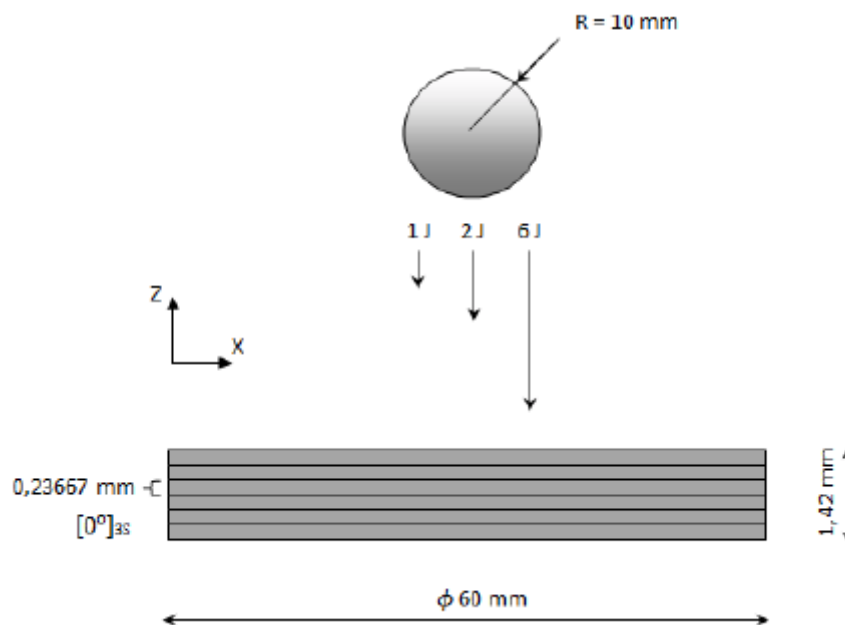


Figura 7.8 Esquema tesis (Zabala Rodriguez, 2014)

Para estudiar el fallo interlaminar por delaminación, se introducen entre las láminas del material elementos cohesivos, cuya curva de comportamiento permite simular dicho fallo.

4.1 Nociones básicas de Patran

Utilizando Patran generaremos un archivo .bdf para modificarlo de forma manual y ejecutarlo en Nastran.

Patran en la mayoría de sus acciones sigue la misma lógica:

- Elegir campo de trabajo: Geometría, Elementos, Condiciones de contorno, Propiedades, etc.
- Elegir acción: crear, modificar, eliminar, etc.

Caracterización y simulación del comportamiento ante impacto de estructuras compuestas tipo sándwich. Propuesta metodológica para un caso real: Pala de Pádel

- Elegir objeto: punto, línea, etc.
- Elegir tipo o método dependiendo del campo elegido.

4.2 Elección del tipo de análisis

Al abrir un archivo nuevo en Patran, se despliega el submenú “New Model Preference” (ver figura 7.9). Si se selecciona la opción “Explicit Nonlinear” en la casilla de “Analysis Type”, el programa carga automáticamente todas las herramientas y opciones pertenecientes al SOL 700 y es configurado para realizar análisis explícitos.

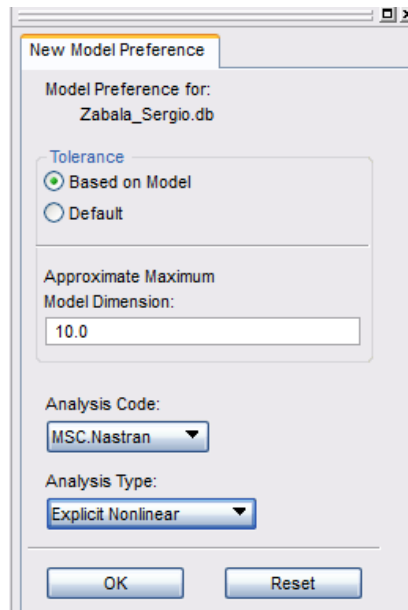


Figura 7.9 Selección de SOL 700 al crear un modelo nuevo.

4.3 Geometría

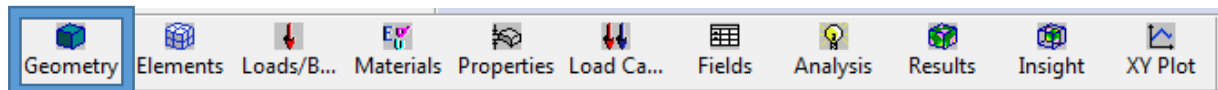


Figura 7.10 Selección del campo de trabajo. Geometría.

Para realizar la placa se va a proceder a generar un cuarto de cilindro para más tarde crear el cilindro completo mediante operaciones de transformación. No se modela la placa como una superficie porque en este modelo se van a emplear elementos cohesivos que solo son aplicables a elementos 3D. Por otro lado, no se genera el cilindro de una sola vez en su totalidad para garantizar un mallado lo más uniforme posible de la placa. Al mallar sólidos circulares, la malla se genera de forma automática de manera radial.

Los pasos para generar la geometría descrita son los siguientes:

1. Creación de una línea de 30 mm. *Action: Create; Object: Curve; Method: xyz; Vector Coordinates List <30 0 0>*

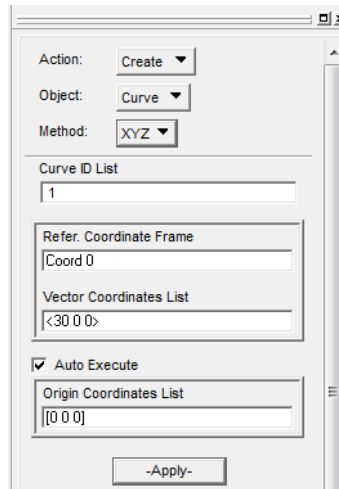


Figura 7.11 Creación de línea en Patran.

2. Revolución de la línea creada 90° alrededor del eje Z (corresponde con 0.3, X e Y son 0.1 y 0.2 respectivamente): *Action: Create; Object: Surface; Method: Revolve. Total Angle 90.0; Axis 0.3.*

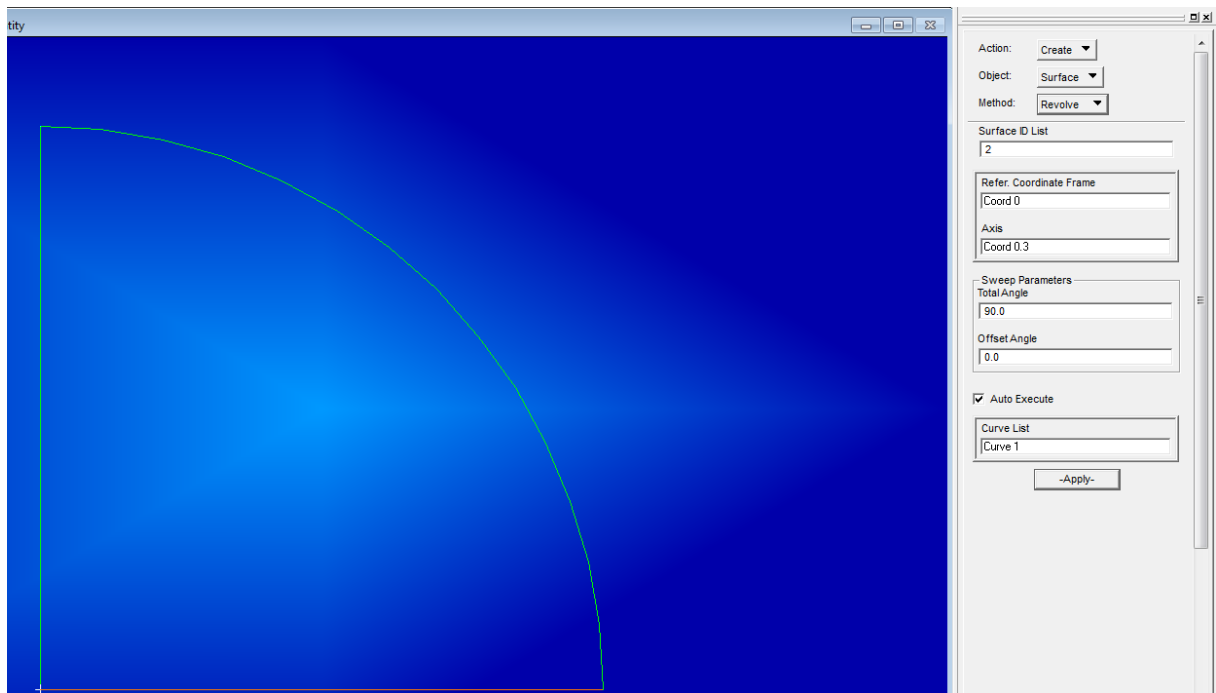


Figura 7.12 Creación de superficie por revolución en Patran.

- Extrusión de la superficie generada 1.47 mm (se ha considerado un espesor para las cinco capas de elementos cohesivos de 0,01): *Action: Create; Object: Solid; Method: Extrude. Translation Vector <0 0 1.47>*

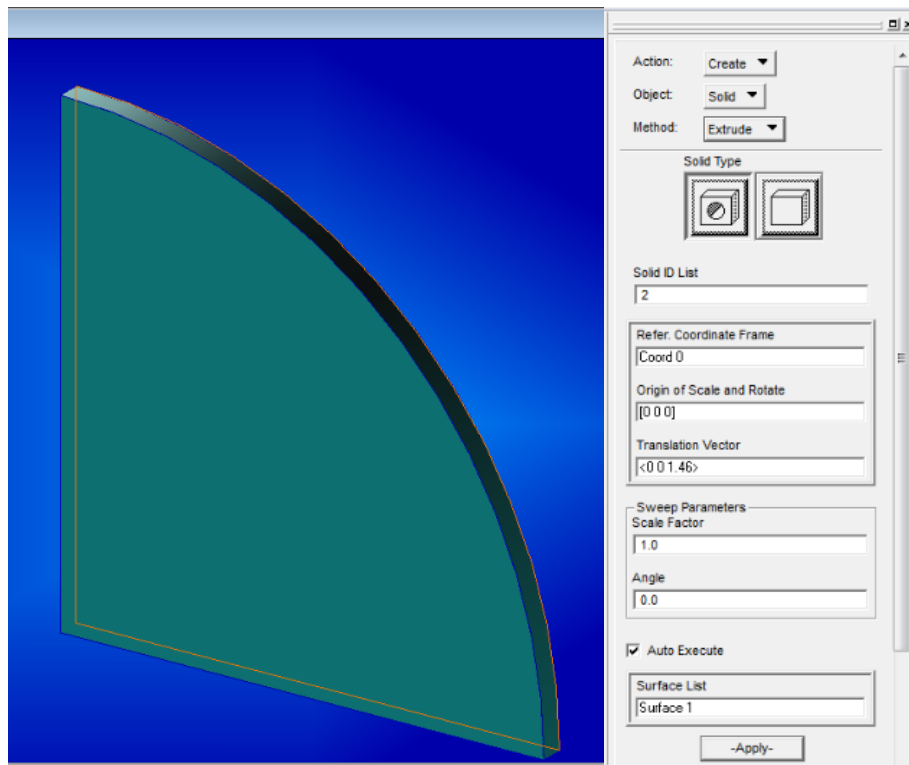


Figura 7.13 Creación de sólido por extrusión en Patran.

- Creación del cilindro completo mediante operaciones de transformación. *Action: Transform; Object: Solid; Method: Extrude.* (Eje 0.1 (eje X) vector normal al plano YZ de simetría).

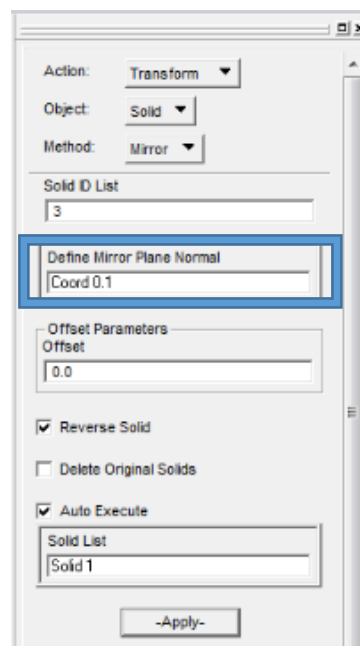


Figura 7.14 Operación de simetría en Patran.

4.4 Mallado

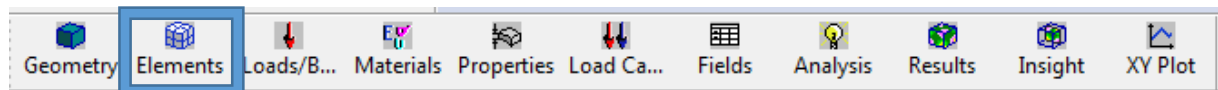
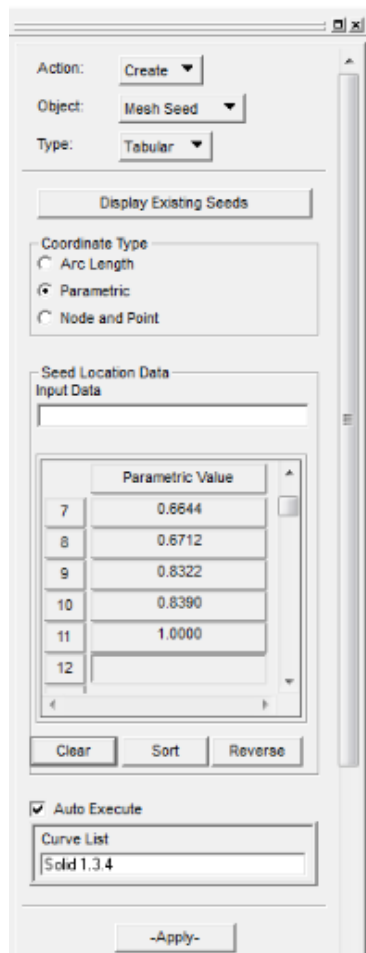


Figura 7.15 Selección del campo de trabajo. Mallado.

- **“Mesh seed”**: Control de la distribución del mallado en la dirección del espesor: *Action: Create; Object: Mesh Seed; Type: Tabular*



	L	M	N	O
26		División	Altura	Altura %
27	Lámina	0,23666	0,23666	0,1609932
28	Cohesivo	0,01	0,24666	0,16779592
29	Lámina	0,23666	0,48332	0,32878912
30	Cohesivo	0,01	0,49332	0,33559184
31	Lámina	0,23666	0,72998	0,49658503
32	Cohesivo	0,01	0,73998	0,50338776
33	Lámina	0,23666	0,97664	0,66438095
34	Cohesivo	0,01	0,98664	0,67118367
35	Lámina	0,23666	1,2233	0,83217687
36	Cohesivo	0,01	1,2333	0,83897959
37	Lámina	0,23666	1,46996	0,99997279

Figura 7.16 Distribución de los elementos en la dirección del espesor.

Los valores que se introducen son las alturas en tanto por uno de los puntos de la división de la línea indicada en las partes que deseamos y con el tamaño que buscamos. Para facilitar el trabajo se puede utilizar una hoja de cálculo (ver figura 7.16).

- “**Mesh**”. *Mallado de la geometría. Action: Create; Object: Mesh; Type: Solid; Elem Shape: Hex; Mesher: IsoMesh; Topology: Hex8;*

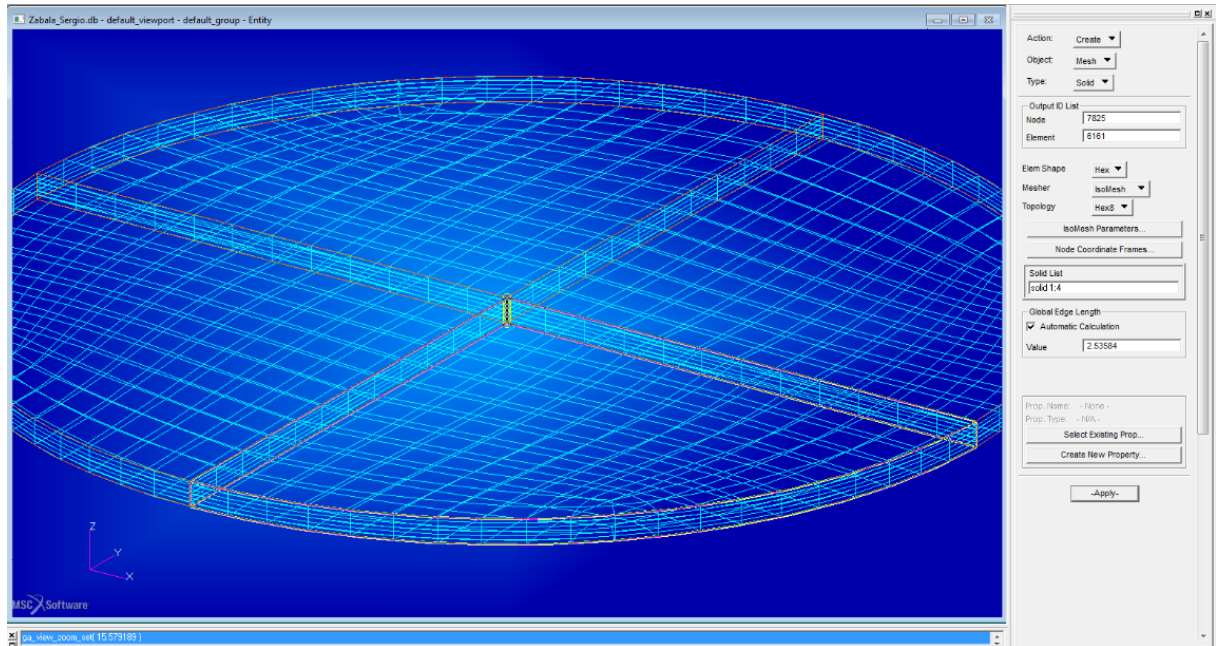


Figura 7.17 Mallado de la placa.

- **Esfera.** Existe una rutina para crear directamente una esfera mallada. *Utilities<FEM-Elements< Create Solid Sphere and HEX Mesh. Radius of Spheres: 10; Cube Dimension: 0; Mesh Seed:5; Position [0 0 13.47]*

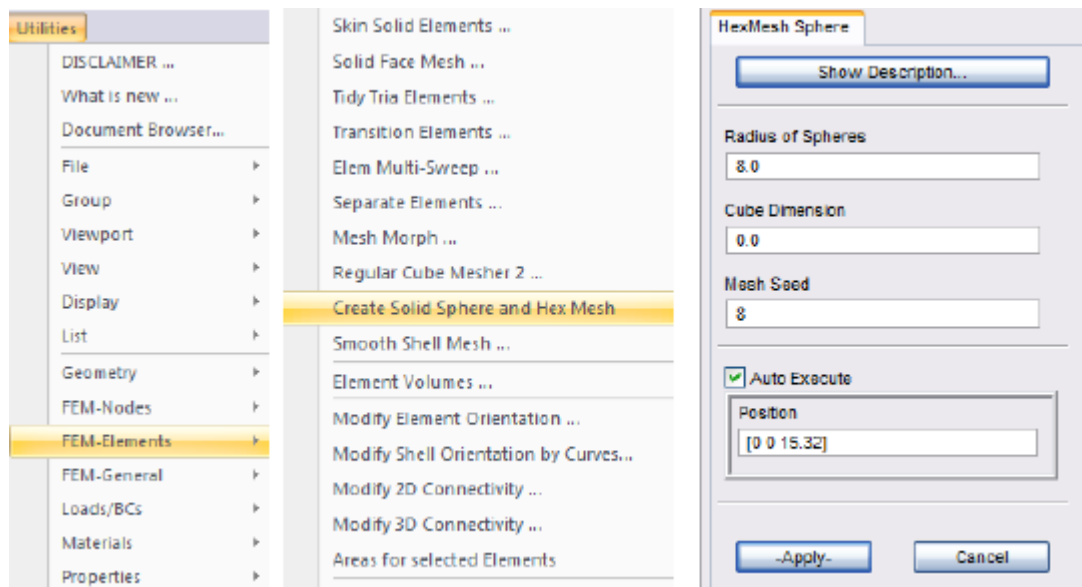


Figura 7.18 Rutina para creación de esfera en Patran.

Radius of Spheres (R): esta casilla determina el valor del radio de la esfera.

Cube Dimensión (L): la utilidad crea una esfera solidad como combinación de varios cuerpos a partir de un núcleo con forma cúbica. Esta casilla determina la longitud de dicho cubo; por defecto el valor establecido es de 1/3 del radio de la esfera, y el rango de variación permitido es:

$$\frac{R}{10} \leq L \leq \frac{R}{2} \quad (7.11)$$

Mesh Seed (S): esta casilla indica el número de elementos aproximados en la dirección radial. La longitud de los elementos se calcula dividiendo el radio por el número aproximado de elementos (R/S).

4.5 Condiciones de contorno

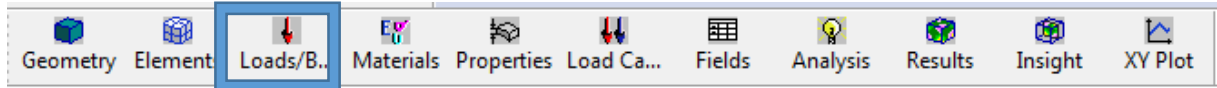


Figura 7.19 Selección del campo de trabajo. Condiciones de contorno.

4.5.1 Desplazamientos

Modelación del empotramiento de la placa: *Action: Create; Object: Displacement; Type: Nodal.* En “*Input data*” se introducen en forma de vectores (uno de desplazamiento y otro de giro) los valores de los desplazamientos que queremos establecer. En “*Select aplicacion region*” se establece los elementos a los que se le aplica la condición de contorno, se puede seleccionar por geometría o por elementos. Es recomendable establecer siempre las condiciones de contorno sobre la geometría, porque facilita y agiliza el trabajo si se modifica la forma del mallado. En este caso, se ha restringido el movimiento de las superficies laterales que delimitan la placa. Ejemplo: Solid 1.4 hace referencia a la cara cuatro del sólido uno.

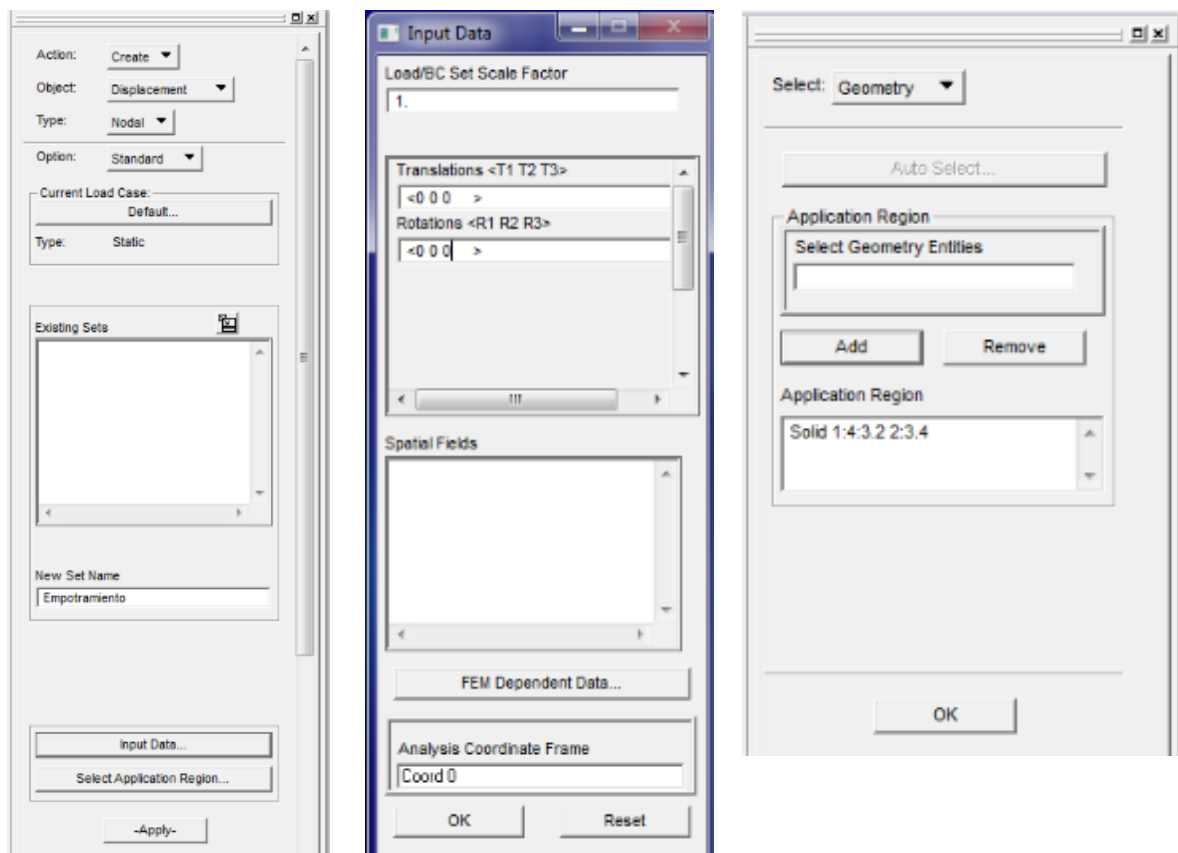


Figura 7.20 Modelo del empotramiento de la placa.

4.5.2 Velocidad inicial

$$h = \frac{E}{m \cdot g} = \frac{2 J}{2 \text{ kg} \cdot 9,8 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} = 0,102 \text{ m} \quad (7.12)$$

$$v_0 = \sqrt{2g(h - h_0)} = \sqrt{2 \cdot 9,8(0,102 - 0,002)} = 1,96 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 1960 \frac{\text{mm}}{\text{s}} \quad (7.13)$$

Donde:

v_0 = Velocidad inicial de la esfera.

h_0 = Separación inicial de la esfera con la placa, medida desde la cara superior de la placa y el punto más bajo de la esfera.

h = Altura correspondiente a la energía potencial igual a la energía de impacto buscada. (ver ecuación 7.12)

Action: Create; Object: Initial Velocity; Type Nodal; "Input Data" Trans Veloc <0 0 -1960>; "Select Application Region": Seleccionar elementos de la esfera.

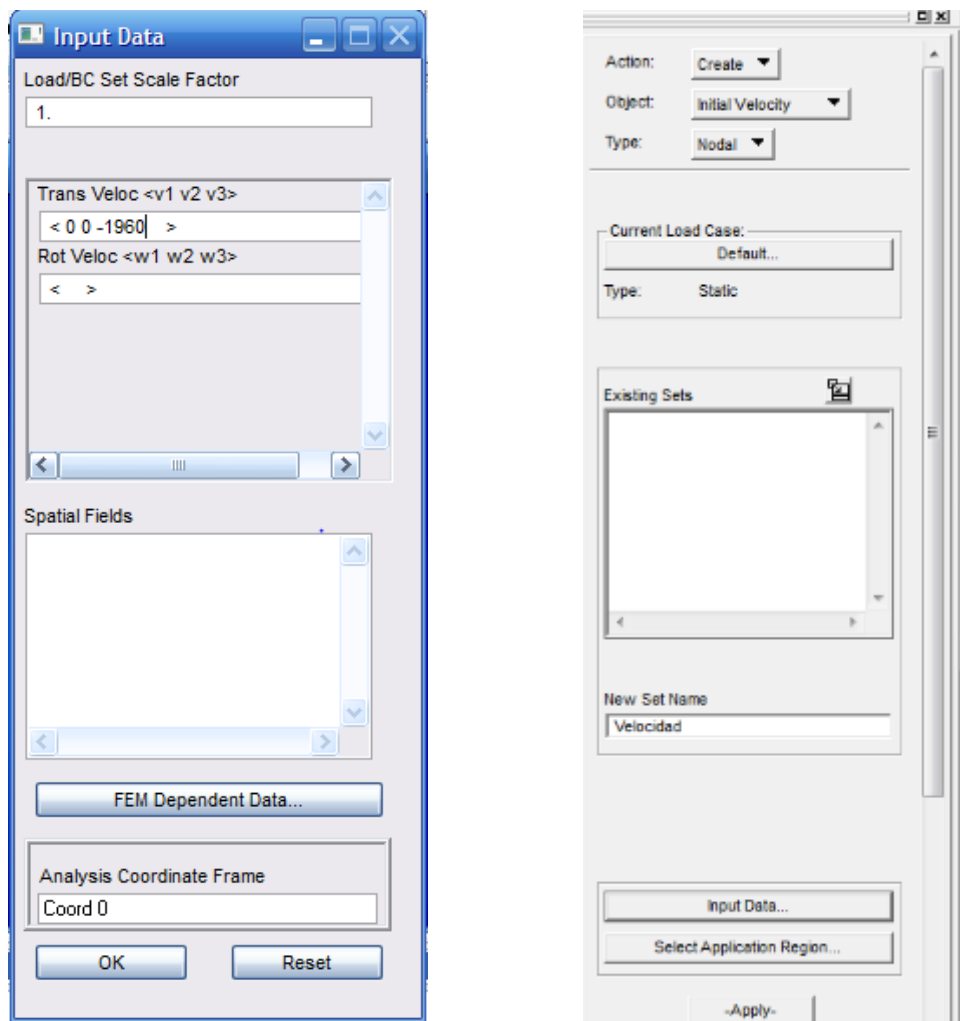


Figura 7.21 Velocidad inicial

4.5.3 Contactos

Action: Create; Object: Contact; Type: Element Uniform; Option: Deformable Body; Target Element Type 3D “Select Application Region”: Seleccionar elementos de la esfera. Repetir operación para la placa.

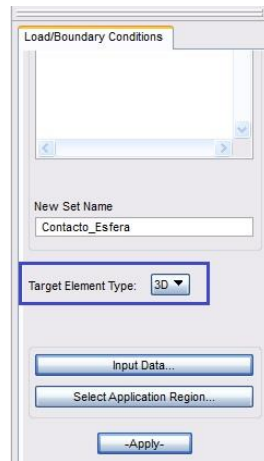


Figura 7.22 Submenú de definición de contactos.

4.5.4 Fuerza de inercia

Las fuerzas de inercia se aplican a todos los cuerpos que forman el modelo. Para introducir las: *Action: Create; Object: Inertial Load; Type: Element Uniform; “Input Data” Trans Accel <0 0 -9800>*

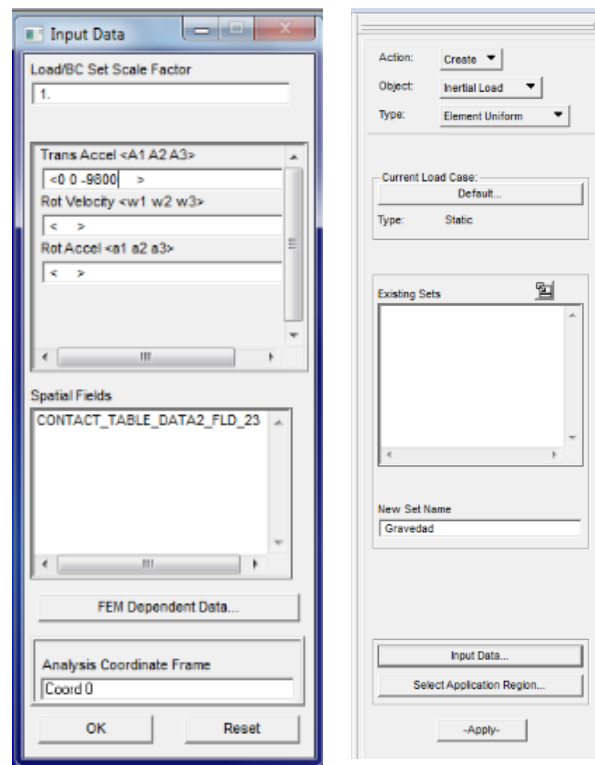


Figura 7.23 Introducción de fuerzas de inercia.

4.6 Definición del material

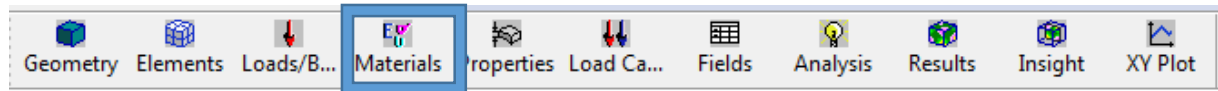


Figura 7.24 Selección del campo de trabajo. Material.

Action: Create; Object: Isotropic (SOL 700); Method: Manual Input

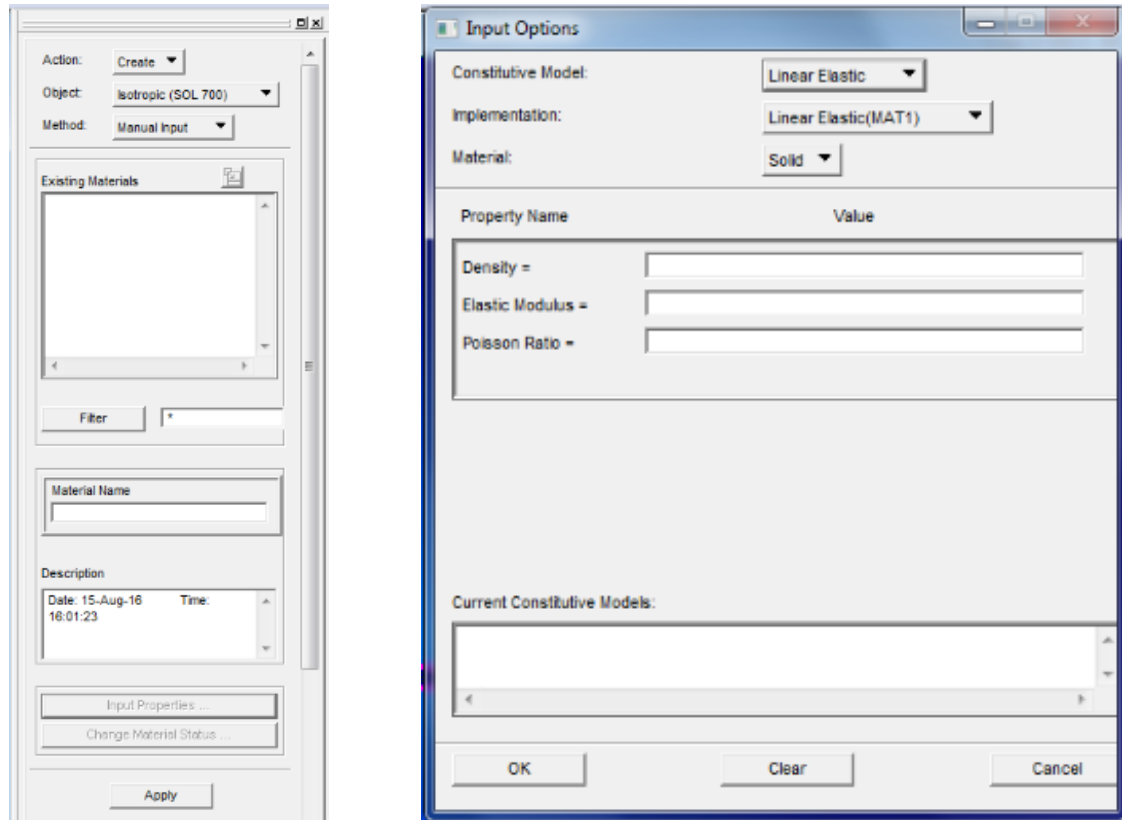


Figura 7.25 Definición del material.

Nastran utiliza tarjetas (tablas) para introducir información, Patran genera esas tarjetas con la información que le introducimos. Existen tarjetas que Patran no es capaz de generar, pero Nastran si lee. En este caso, el material cohesivo es necesario introducirlo de forma manual en el archivo .bdf. Mediante el procedimiento anterior, generaremos tres materiales cualesquiera que más tarde modificaremos. Los materiales a definir son los siguientes:

- **Material de la esfera**

La tarjeta que define las propiedades del material elástico lineal utilizado para caracterizar la esfera es:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
MATD001	MID	RO	E	PR	DA	DB	K	Option		
	VC	CP								

Figura 7.26 Tarjeta MATD001 Isotropic Elastic-SOL 700 (MSC Nastran, 2014c)

El significado de los parámetros más importantes de la tarjeta MAD001 se recoge en la tabla 7-2:

Tabla 7-2 Parámetros de la tarjeta MATD001 Isotropic Elastic - SOL 700

MATD001 Isotropic Elastic - SOL 700	
MID	Indicador del material, debe tener un valor único en todo el modelo.
RO	Densidad.
E	Módulo de elasticidad o de Young.
PR	Módulo de Poisson.
DA	Factor de amortiguamiento axial para amortiguar el ruido numérico. Requerido sólo para elementos de viga Belytschko-Schwer.
DB	Factor de amortiguamiento en flexión para amortiguar el ruido numérico. Requerido sólo para elementos de viga Belytschko-Schwer.
K	Módulo de compresibilidad requerido sólo para fluidos.
Option	FLUID cuando quiera definirse un fluido. Por defecto esta casilla permanece vacía.
VC	Coefficiente de viscosidad.
CP	Presión de cavitación.

No es necesario introducir todos los parámetros que solicita Nastran (figura 7.26), se puede caracterizar el material solo introduciendo el identificador, la densidad, el módulo elástico y el coeficiente de Poisson. Siendo los valores introducidos en este caso los indicados en la tabla 7-3.

Tabla 7-3 Tarjeta MATD001 a introducir en el archivo de análisis (.bdf)..

MATD001	3	4.77-7	206700.	.3

La densidad del material de la esfera se calcula a partir del volumen de la esfera y del peso de esta, ambos valores conocidos. El valor de la densidad se introduce en toneladas/mm³. Los valores referentes a tensión se introducen en MPa.

- **Material de la lamina**

La tarjeta que define las propiedades del material ortótropo lineal utilizado para caracterizar las láminas es:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
MATORT	MID	E1	E2	E3	NU12	NU23	NU31	RHO	
	G12	G23	G31	A1	A2	A3	TREF	GE	
	IYLD	IHARD	SY		Y1	Y2	Y3	N/A	
	Yshr1	Yshr2	Yshr3	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	

Figura 7.27 Tarjeta MATORT Elastic 3D Orthotropic Material Properties (MSC Nastran;2014c)

El significado de los parámetros más importantes de la tarjeta MAD001 se recoge en la tabla 7-4:

Tabla 7-4 Parámetros de la tarjeta MATORT Elastic 3D Orthotropic Material Properties.

MATORT Elastic 3D Orthotropic Material Properties	
MID	Indicador de la tarjeta MATORT.
E1	Módulo de elasticidad o de Young en la dirección longitudinal (dirección 1). Parámetro que debe ser introducido.
E2	Módulo de elasticidad o de Young en la dirección transversal (dirección 2). Parámetro que debe ser introducido.
E3	Módulo de elasticidad o de Young en la dirección del espesor (dirección 3). Parámetro que debe ser introducido.
NU12	Módulo de Poisson (ϵ_2/ϵ_1) con carga uniaxial en la dirección 1. Parámetro que debe ser introducido.
NU23	Módulo de Poisson (ϵ_3/ϵ_2) con carga uniaxial en la dirección 2. Parámetro que debe ser introducido.
NU31	Módulo de Poisson (ϵ_1/ϵ_3) con carga uniaxial en la dirección 3. Si no se introduce se tomará por defecto el valor introducido en el parámetro NU23.
RHO	Densidad.
G12	Módulo de elasticidad transversal en el plano 1-2. Parámetro que debe ser introducido.
G23	Módulo de elasticidad transversal en el plano 2-3. Parámetro que debe ser introducido.
G31	Módulo de elasticidad transversal en el plano 3-1. Parámetro que debe ser introducido.

Los valores introducidos para caracterizar el material ortótropo son los recogidos en la tabla 7-5:

Tabla 7-5 Tarjeta MATORT a introducir en el archivo de análisis (.bdf).

MATORT	1	57300.	57300.	2920.	0.179	0.35	0.0178	1.42-9
	3080.	1216.	1216-					

La densidad se introduce en toneladas/mm³ y los valores referentes a tensión en MPa.

- **Material cohesivo**

La tarjeta que define las propiedades del material cohesivo utilizado es:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
MATD185	MID	RO	ROFLG	INTFAIL	SIGMAX	NLS	TLS		+
+	LAMDA1	LAMDA2	LAMDAF	STFSF					

Figura 7.28 Tarjeta MATD185 Tvergaard and Hutchinson Cohesive Model - SOL 700 (MSC NASTRAN, 2014c)

El significado de los parámetros más importantes de la tarjeta MATD185 se recoge en la tabla 7-6:

Tabla 7-6 Parámetros de la tarjeta MATD185 Tvergaard and Hutchinson Cohesive Model Material Properties

MATD185 Tvergaard and Hutchinson Cohesive Model - SOL 700	
MID	Identificador del material. Debe ser único en el modelo.
RO	Densidad.
ROFLG	Parámetro para indicar si la densidad se ha establecido por unidad de volumen o por unidad de área. 0 Densidad especificada por unidad de volumen. 1 Densidad especificada por unidad de área.
INTFAIL	Número de puntos de integración que deben alcanzar el criterio de fallo para eliminar el elemento cohesivo del modelo. Si es especificado como 0 el elemento cohesivo no será eliminado incluso alcanzándose el criterio de fallo. El rango en el que puede moverse es de 1 a 4 ya que este tipo de elementos tienen 4 puntos de integración.
SIGMAX	Tensión última que establecerá el inicio del daño.
NLS	Máximo desplazamiento relativo permitido en la dirección normal (modo I).
TLS	Máximo desplazamiento relativo permitido en la dirección tangencial (modo II).
LAMDA1	Distancia escalada para definir el punto de máxima tracción en la ley constitutiva del material (Λ_1).
LAMDA2	Distancia escalada para definir el punto de inicio de degradación en la ley constitutiva del material (Λ_2).
LAMDAF	Distancia escalada para definir el punto fallo en la ley constitutiva del material (Λ_{fail}).
STFSF	Factor de rigidez en caso de penetración.

Los valores introducidos para caracterizar el material cohesivo son los recogidos en la tabla 7-7:

Tabla 7-7 Tarjeta MATD185 a introducir en el archivo de análisis (.bdf).

MATD185	2	1.42-9	0	4	41.6	2.385-2	4.813-2
	2.28-3	2.28-3	1.	0.			

4.7 Definición del elemento

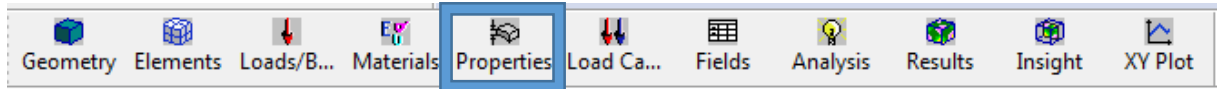


Figura 7.29 Selección del campo de trabajo. Propiedades del elemento.

Action: Create; Object: 3D; Type: Solid.

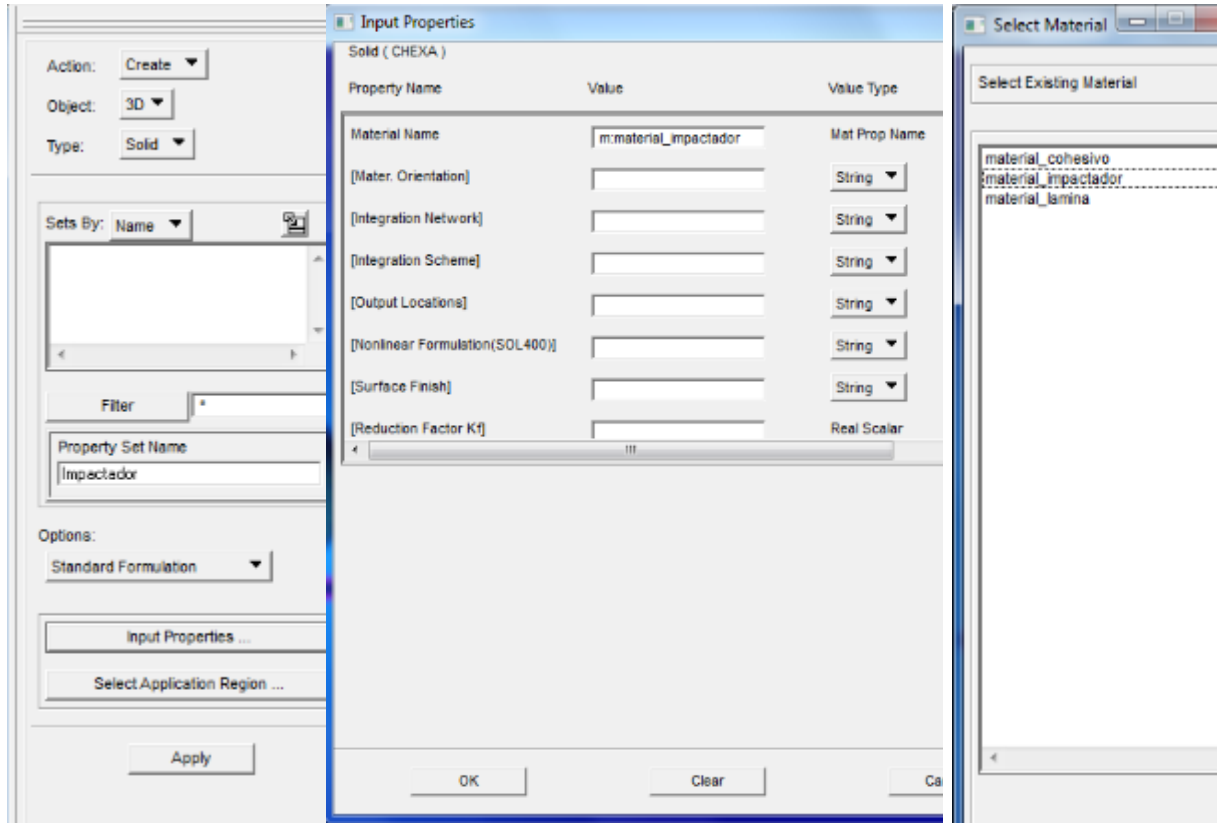


Figura 7.30 Definición de las propiedades de los elementos Patran.

En *Option* seleccionamos el tipo de integración. Para la esfera y las láminas se selecciona *Standard Formulation*, para los elementos cohesivos la opción “*PSOLIDD*”, integración completa, cuya tarjeta se modificara en el archivo *.bdf*.

Tarjeta PSOLIDD

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PSOLIDD	PID	MID	ELFORM	EOSID	CORDM	COROT	TMID		
	A1	A2	A3	D1	D2	D3			

Figura 7.31 Tarjeta PSOLIDD (MSC NASTRAN, 2014c)

El significado de los parámetros más importantes de la tarjeta PSOLIDD se recoge en la tabla 7-6:

Tabla 7-8 Principales parámetros de la tarjeta PSOLIDD.

PSOLIDD Additional Property Specification Data for Solid Elements	
PID	Identificador de propiedad.
MID	Identificador del material a aplicar a los elementos.
ELFORM	Tipo de formulación a aplicar a los elementos. Para elementos cohesivos son las que se detallan a continuación.
19	Elemento cohesivo de 4 puntos de integración. Sólo disponible para elementos hexaédricos 3D.
20	Elemento cohesivo de 4 puntos de integración con offsets (compensaciones) para el uso con elementos shell. Sólo disponible para elementos hexaédricos 3D.
CORDM	Identificador de los ejes de coordenadas definidos en el material a aplicar al elemento. Por defecto serán los ejes de coordenadas globales del modelo.

El tipo de formulación para los elementos cohesivos MATD185 queda restringida a la formulación 19 ó 20, que son análogas con la única diferencia de que la formulación 20 es idónea para modelos en los que los elementos cohesivos interaccionan con elementos tipo Shell (2D)

En “Input Data” seleccionamos el tipo de material y en “Select application region” se seleccionan los elementos a definir.

4.8 Análisis

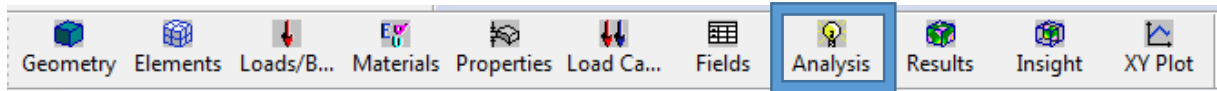


Figura 7.32 Selección del campo de trabajo. Análisis.

Los apartados a tratar del submenú de análisis (ver figura 7.33) son *Solution Type* y *Subcases*

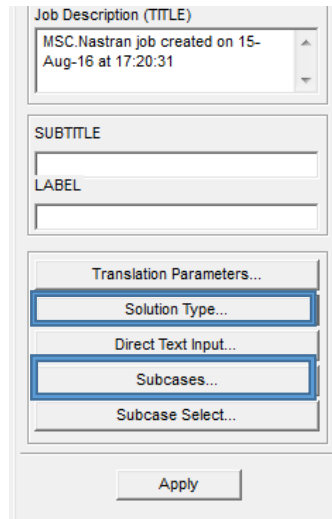


Figura 7.33 Submenú del campo "Analysis".

4.8.1 "Solution Type"

Se configura el análisis estableciendo los parámetros de control del paso del tiempo (*Execution Control Parameters*), de los modos de hourglass (*General Parameters*) y definiendo el tipo de resultados que evolucionan en el tiempo que queremos obtener del análisis (*Time History Output Request*). Para acceder a estas opciones seguir los pasos mostrados en la figura 7.34:

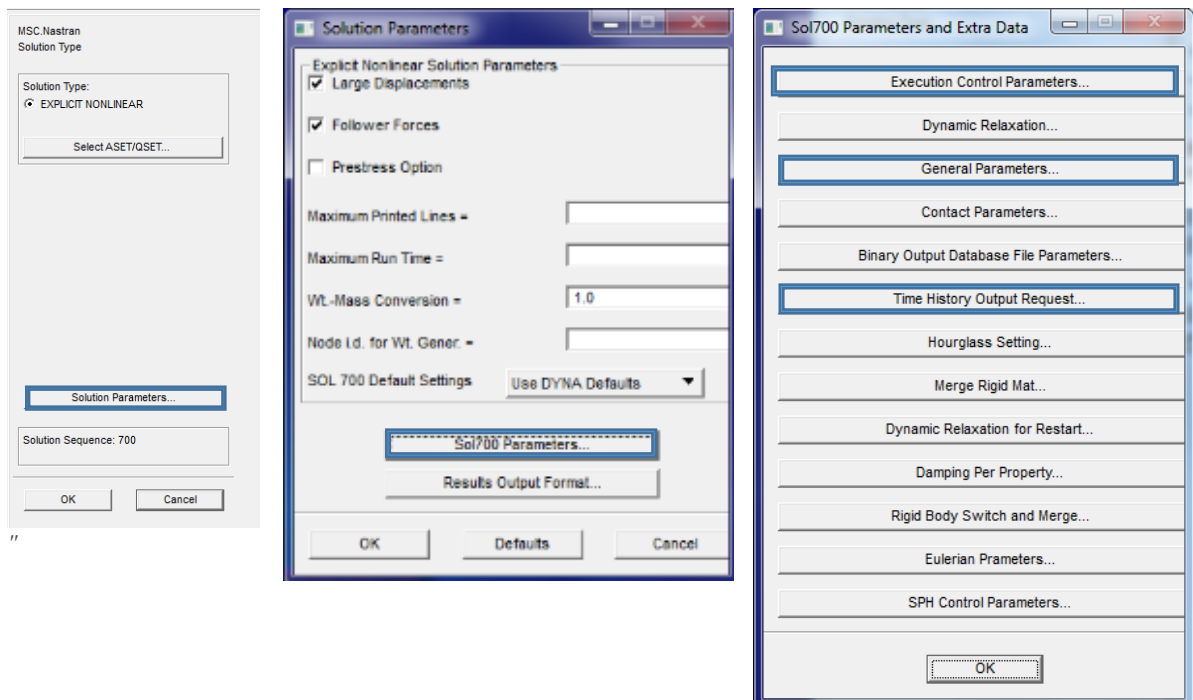


Figura 7.34 Configuración del análisis "Solution Type"

- **“Execution Control Parameters”**

“Execution Control Parameters” es una opción que permite realizar un control del paso de tiempo en el cálculo explícito independientemente del tiempo crítico computado por el software, que se basa en el criterio de Courant:

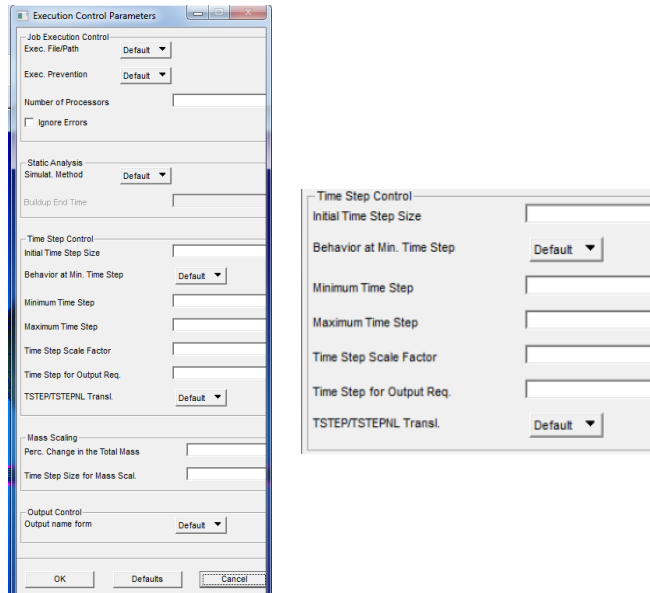


Figura 7.35 “Execution Control Parameters”

- **“Initial Step Size”**: Fija el valor para el primer incremento de tiempo computado.
- **“Minimum Time Step”**: Fija el valor mínimo del incremento de tiempo. En caso de que algún elemento del modelo suponga el cálculo de un incremento inferior al fijado no se tendrá en cuenta.
- **“Maximum Time Step”**: Fija el valor máximo del incremento de tiempo. En caso de que algún elemento del modelo suponga el cálculo de un incremento superior al fijado no se tendrá en cuenta.
- **“Time Step Scale Factor”**: Fija el valor del coeficiente de seguridad α para el cálculo del incremento de tiempo crítico según el criterio de Courant.
- **“Time Step for Output Req.”**: Fija el valor del incremento de tiempo para el que se requiere que el software devuelva un archivo de resultados. Como norma general, los cálculos son realizados con el incremento crítico computado por defecto, por lo que, en el caso de fijar un valor para esta opción, el programa devolverá automáticamente el paso calculado con un valor de incremento lo más próximo posible al valor indicado en esta opción. Es decir, si el incremento crítico computado resulta ser por ejemplo 0,003 segundos, y se requiere un archivo de resultados cada 0,01 segundos, el software devolverá como archivo de resultados el correspondiente al instante 0,009 segundos.

- **“General Parameters”**

Esta opción permite realizar un control general a todo el modelo sobre los modos de hourglass:

- **“Hourglass Visc. Type”**: Permite elegir el tipo de control para los modos de.
- **“Hourglass Coeff.”**: Fija el valor del coeficiente de hourglass.
- **“Compute Hourglass Energy”**: Activar esta opción introduce la orden de que el software debe calcular la energía de hourglass en el modelo, pero no genera el archivo con los valores de esta, para ello se debe recurrir a la opción que se explica en el siguiente punto.

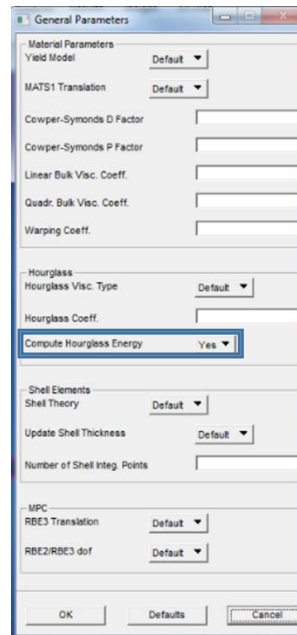


Figura 7.36 "General Parameters"

- **“Time History Request”**

Esta opción permite indicar al software que se requieren los ficheros de resultados que incorporan los datos referentes a la energía interna y de hourglass del modelo, y la fuerza de contacto.

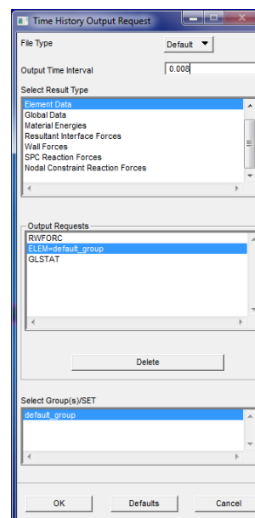


Figura 7.37 "Time History Request"

- “Output Time Interval”: Fija el valor del incremento de tiempo para el cual se requiere escribir un resultado en el fichero de salida. Este valor es independiente al usado para el análisis explícito, ya que se emplea para generar un fichero diferente.
- “Select Result Type”: Permite escoger que resultados se requieren. Para el caso de la energía de hourglass es necesario seleccionar las opciones “Material Energies” y “Global Data”. El primero es el encargado de computar las diferentes energías del modelo, y el segundo induce la orden de general el fichero de resultados. La opción referente para la fuerza de contacto es “Wall Forces”
- “Output Requests”: Indica los resultados que se han requerido previamente. Para el caso de la energía de hourglass, compruébese que aparecen las órdenes “MATSUM” y “GLSTAT”. Para la fuerza de contacto debe aparecer la orden “RWFORC”

4.8.2 “Subcases”

El submenú “Subcases” (ver figura 7.38), permite gestionar los distintos casos de cálculo implementados modificando ciertos parámetros como son el tiempo de simulación o los resultados que se quieren obtener.

Es de interés en este menú, la opción “Subcase Parameters” De todos los parámetros que ofrece configurar la opción “Subcase Parameters” es requisito cumplimentar los dos siguientes:

- “Ending Time”: Tiempo que se va a prolongar la simulación (para este ejemplo se ha escogido 0,008 segundos).
- “Number of Time Steps”: Número de pasos de tiempo para los que se van a devolver los resultados obtenidos en el análisis (en este caso 100). El límite para este valor es el de los pasos de tiempo computados por el programa en función del tiempo de simulación y el paso de tiempo crítico calculado por el software:

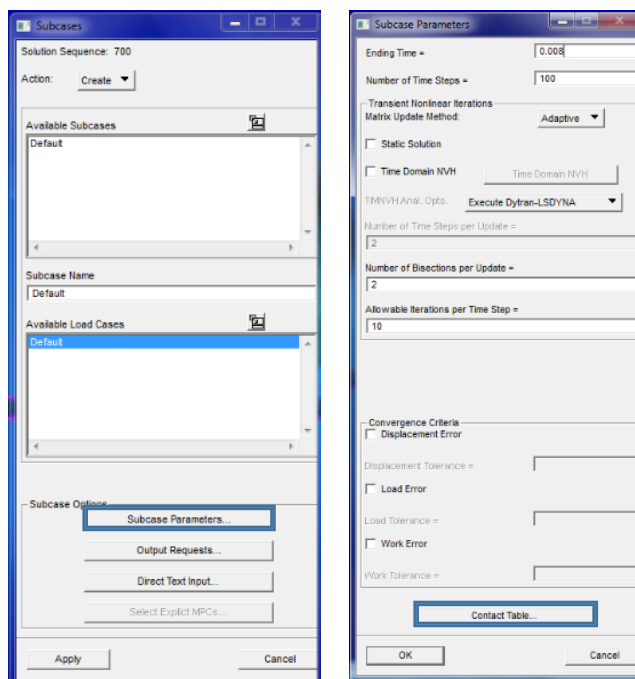


Figura 7.38 Submenú “Subcases”

- **“Contact Table”**

Por último se va a mostrar la opción “Contact Table” (ver figura 7.39), la cual permite gestionar en su mayor parte cómo se debe computar el contacto entre ambos cuerpos. Para acceder a ella seguir los pasos de la figura 7.38. Las opciones principales necesarias son:

- “Global Contact Detection”: Esta opción es la que gestiona de manera general que cuerpos están en contacto relativo. Cómo el orden de definición de los contactos no influye en el análisis realizado con el SOL 700, para este ejemplo se ha optado por habilitar la opción “Default” .
- “Contact Matrix”: Es la matriz que muestra de manera gráfica que contactos se permiten. Esta opción nos permite de forma manual personalizar la opción escogida en la opción “Global Contact Detection”. Para ello es necesario situar el cursor en la celda que sea de interés y clicar sobre ella, con cada click cambiará la situación (T – Touch, G – Glue, celda en blanco – no se considera el contacto). Así, para el ejemplo empleado, no se considera el autocontacto por separado de la esfera o la placa, con lo que dichas celdas aparecen en blanco. Por otra parte, los contactos habilitados son:
 - Contacto relativo Esfera (Cuerpo 1) – Placa (Cuerpo 2)
 - Contacto relativo Placa (Cuerpo 2) – Esfera (Cuerpo 1)

Como normal general, siempre que se modelice un problema de contacto entre dos cuerpos deformables, será de interés permite el contacto relativo en ambas direcciones. Y en el caso de que alguno de los cuerpos sea rígido puede ser recomendable habilitar tan sólo el contacto relativo en la dirección deformable - rígido.

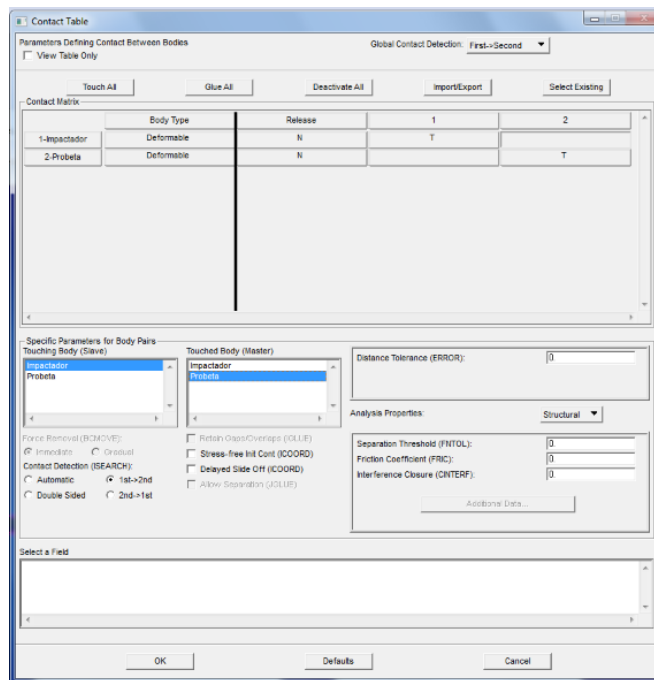


Figura 7.39 “Contact Table”

4.9 Generación de archivo .bdf .

Por último se genera el archivo .bdf que modificaremos manualmente como se explica en el Anexo A Inclusión de parámetros de forma manual en el fichero de análisis (.bdf) de Ismael Burgos de la Rosa, “*Simulación de impacto sobre materiales compuestos laminados*” (Burgos de la Rosa, 2015)

Para crear este archivo se procede según la figura 7.40: *Action: Analyze; Object: Entire Model; Method: Analysis Deck*. En la casilla “*Job Name*” se nombra el archivo.

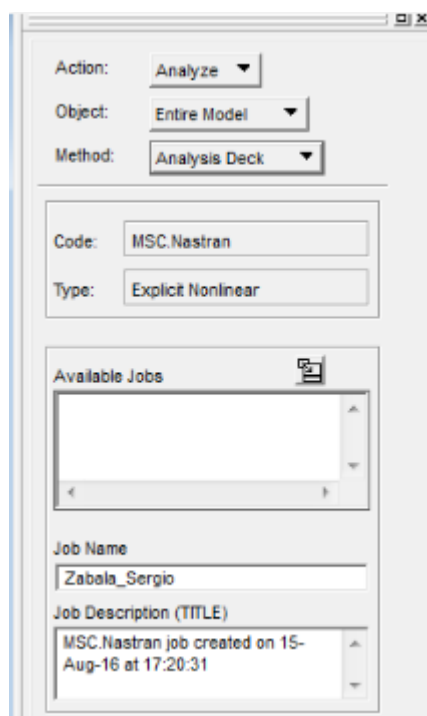


Figura 7.40 Generación del archivo .bdf

Para visualizar los resultados mediante LS-PrePost ver Anexo A Manual de LS-PrePost

Para ejecutar de forma eficiente el archivo .bdf ver Anexo B Como habilitar en Nastran el empleo de de varios procesadores para el procesamiento paralelo en el sistema operativo Windows del trabajo de Pablo Antonio Mesa Castro, “*Simulación de impacto de baja energía mediante el método de los elementos finitos*” (Mesa Castro, 2014).

Capítulo 8 Simulación mediante elementos finitos del comportamiento a impacto de las palas de pádel Marvel

1 Introducción

En este capítulo se pretende crear un modelo numérico que permita simular el comportamiento del material que forma la pala de pádel. Este modelo no pretende ser una recreación del impacto real al que es sometida la pala, debido a que las condiciones de contorno reales que se dan durante el ensayo de impacto han resultado ser demasiado complejas de modelar. Estas dificultades se tratan en mayor profundidad en el capítulo 9 Correlación numérico experimental.

Este capítulo desarrolla el modelo numérico realizado y estudia la influencia de las propiedades que caracterizan el material que conforma la pala.

El modelo numérico desarrollado trata de un impacto de 11 J, mediante un impactador esférico con una masa de 2410g alcanzando una velocidad alrededor a los 3 m/s.

2 Planteamiento

2.1 Geometría

El modelo está constituido por un cilindro, probeta en adelante, que simula la zona de golpeo de la pala de pádel; situado entre dos anillos que fijan su posición. Situada sobre el eje del cilindro a una distancia determinada de este se sitúa una esfera que simula el impactador esférico.

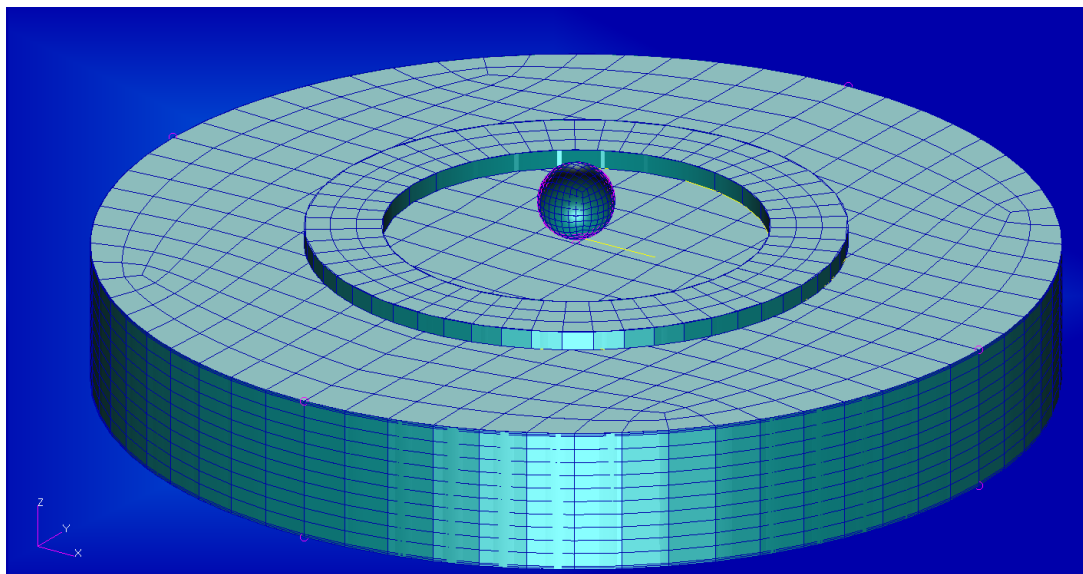


Figura 8.1 Modelo numérico.

2.2 Probeta

La probeta, parte roja y verde de la figura 8.2, está constituida por un cilindro de 250 mm de diámetro y 38 mm de altura total. La piel superior e inferior tiene un espesor de 0,85 mm cada una y 36,30 mm el núcleo.

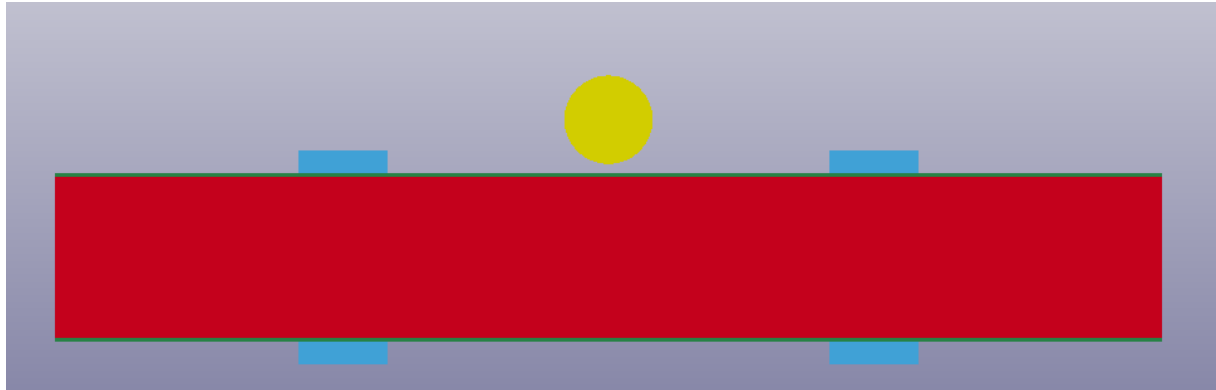


Figura 8.2 Corte transversal del modelo numérico.

2.3 Esfera

El impactador está constituido por una esfera de 20 mm de diámetro cuyo centro se encuentra a 12 mm de la superficie superior de la probeta, dejando un espacio entre ambas de 2 mm.

2.4 Anillos

Los anillos se encuentran situados a una distancia de 0,05 mm de las superficies superior e inferior de la probeta. Tienen un diámetro interior y exterior de 100 y 140 mm respectivamente con un espesor de 5 mm.

2.5 Materiales

2.5.1 Probeta

La probeta está formada por dos partes:

- **Núcleo:** Las propiedades estudiadas de la espuma polimérica son las siguientes:

$$E_x = 0,417 \text{ MPa} \quad \rho = 27,8 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 2,78 \times 10^{-11} \frac{\text{t}}{\text{mm}^3}$$

No obstante, estos son los valores introducidos para la simulación:

$$E_x = 0,2 \text{ MPa} \quad \nu = 0,01 \quad \rho = 2,78 \times 10^{-11} \frac{\text{t}}{\text{mm}^3}$$

El módulo elástico de $E_x = 0,417 \text{ MPa}$ corresponde al módulo elástico determinado para la espuma en un ensayo de impacto de 11J (ver capítulo 5) produciéndose el impacto a la misma velocidad que a la que se produce en esta simulación. Sin embargo, la espuma en ese ensayo está embebida en un utensilio de sujeción de forma que sus desplazamientos se encuentran coartados en gran medida, lo que se traduce en una mayor rigidez en el comportamiento de la espuma. En el ensayo de impacto sobre la pala, la espuma no se encuentra tan coartada, y en base a los ensayos de compresión en situación libre y restringida (ver capítulo 5) cuyo comportamiento de la espuma muestra

prácticamente la mitad de rigidez en la situación libre, se opta por disminuir el módulo elástico de la misma hasta $E_x = 0,2 \text{ MPa}$.

Se opta por coeficiente de Poisson $\nu = 0,01$. Era necesario introducir algún valor para realizar la simulación, pero dicho valor no ha sido determinado por ningún tipo de ensayo o estimación. A lo largo de este capítulo se estudiará la influencia de este parámetro en el comportamiento del modelo.

Destacar que a pesar del comportamiento viscoelástico del núcleo, que hace que su comportamiento dependa de la velocidad de deformación, este se ha definido como un material elástico lineal. Esta elección ha sido motivada por las siguientes razones:

- Falta de datos para la caracterización en Patran del núcleo como un material viscoelástico.
- Simplificación del problema. En la simulación la velocidad de impacto es la misma que la que se toma en uno de los ensayos de caracterización de la espuma. De esta forma se reduce la influencia de la velocidad de deformación, porque la rigidez que caracteriza a la espuma en ambas situaciones es la misma. El modelo, con estas propiedades del material, no sería apto para impactos producidos a otra velocidad.

Pieles: Las propiedades de las pieles de la pala Marvel, formadas cada una por tres láminas de tejido de espesor 0,28 mm, que nos interesan para la simulación son las siguientes:

Tabla 8-1 Propiedades de la pala Marvel para modelo numérico.

$E_1 = E_2 = 12100 \text{ MPa}$	$E_4 = E_5 = 1920 \text{ MPa}$
$E_6 = 1900 \text{ MPa}$	$\nu_{12} = 0,09$
$E_3 = 4190 \text{ MPa}$	$\nu_{12} = \nu_{21} = 0$
$\rho = 1426 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 1,426 \times 10^{-9} \frac{\text{t}}{\text{mm}^3}$	

Este material se ha definido como un material ortótropo, de la misma forma que en el ejemplo desarrollado en capítulo 7.

2.5.2 Esfera

La esfera se ha modelado como acero, pero con una densidad tal que simule la masa del impacto ocupando el volumen de la esfera.

Tabla 8-2 Masa del impactador.

Elemento	Masa (g)
Dardo + extensión	1035,0
Tup holder	1300,0
Masa extra	0,0
Tup	75,0
Total	2410,0

$$\rho = \frac{m}{\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3} = \frac{2,41 \text{ kg}}{\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot (10 \text{ mm})^3} = 5,7534 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{mm}^3} = 5,75 \times 10^{-7} \frac{\text{t}}{\text{mm}^3} \quad (8.1)$$

Donde m es la masa del impactador y r el radio de la esfera.

Las propiedades introducidas para caracterizar la esfera son:

Tabla 8-3 Propiedades de la esfera.

$E_x = 210\,000 \text{ MPa}$
$\nu_{12} = 0,3$
$\rho = 5,75 \times 10^{-7} \frac{\text{t}}{\text{mm}^3}$

Se ha definido el material de la esfera como elástico lineal.

2.5.3 Anillos

El anillo superior es de aluminio y el inferior de acero. Sin embargo, dada su rigidez prácticamente actúan como indeformables. Ambos se han modelado como acero, cuyas propiedades son las siguientes:

Tabla 8-4 Propiedades de los anillos de jujeción.

$E_x = 210\,000 \text{ MPa}$
$\nu_{12} = 0,3$
$\rho = 7,85 \times 10^{-9} \frac{\text{t}}{\text{mm}^3}$

Se ha definido el material de los anillos como elástico lineal.

2.6 Condiciones de contorno

2.6.1 Desplazamientos

Las caras más externas de los anillos de sujeción, cara superior del anillo superior y cara inferior del anillo inferior, se encuentran empotradas.

2.6.2 Contactos

Se han definido todos los cuerpos como sólidos deformables. Porque la versión SOL 700 cuenta con algunas limitaciones de modelización en el caso de problemas que involucren situaciones de contacto, las más destacables:

- No es posible la modelización de problemas de contacto en 2D, deben hacerse tridimensional (MSC Software Corporation , 2012)
- No es posible definir un contacto rígido sobre un cuerpo tridimensional de la forma general, para ello debe asignarse como propiedad un material modelado como rígido (MSC Software Corporation , 2012).

Y se han definido los siguientes dos contactos posibles:

Esfera-Probeta

Probeta-Anillos

El resto de parámetros de contacto se han dejado por defecto.

2.6.3 Velocidad inicial

Para ahorrar tiempo de cálculo en el modelo numérico, la esfera se ha situado a 2 mm de la superficie de la probeta. Para simular la caída libre desde una altura determinada se establece una velocidad inicial a la misma.

Se calcula la altura del impacto como caída libre (h) conociendo la energía puesta en juego en el mismo (E) y la masa del impactador (m), siendo g la gravedad.

$$h = \frac{E}{m \cdot g} = \frac{11 J}{2,41 kg \cdot 9,8 \frac{m^2}{s}} = 0,466 m \quad (8.2)$$

Conocida la altura del impacto como caída libre (h) y la altura a la que se encuentra el impactador de la probeta en el modelo numérico (h_0), se puede establecer la velocidad inicial necesaria para simular el impacto con la energía deseada (v_0).

$$v_0 = \sqrt{2g(h - h_0)} = \sqrt{2 \cdot 9,8, (0,466 - 0,002)} = 3,015 \frac{m}{s} = 3015 \frac{mm}{s} \quad (8.3)$$

Se puede observar como la velocidad de impacto es la misma que la del ensayo de caracterización de la espuma del capítulo 5, epígrafe 5 Ensayos de impacto.

2.6.4 Fuerzas de inercia: Gravedad

Se ha introducido la fuerza de la gravedad ($G= 9800 \text{ mm/s}^2$) como una carga inercial definida con un vector de aceleración de $\langle 0, 0, -9800 \rangle$.

2.7 Mallado

El mallado de la probeta se ha realizado controlando la distribución y tamaño de los elementos en las direcciones radial y vertical. Se ha realizado un estudio de convergencia para determinar qué tamaño de elemento es el más adecuado en cada dirección. Se han estudiado de forma separada el mallado correspondiente a las pieles y el correspondiente al núcleo.

El impactador se ha generado de forma automática mediante el procedimiento descrito en el capítulo 7 apartado 4.3 Geometría.

El mallado de los anillos no ha sido controlado en su distribución, solo se ha indicado el tamaño del elemento.

Se ha realizado un estudio de convergencia para analizar la influencia del mallado del impactador y de los anillos.

2.8 Definición del elemento

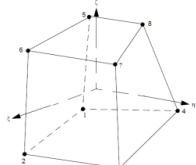
Se ha optado por utilizar elementos sólidos tridimensionales en este estudio, concretamente elementos hexaédricos de ocho nodos definidos por la tarjeta CHEXA 8 en Nastran (Ver capítulo 7 apartado 3.4 Definición del elemento.).

A pesar de que elementos bidimensionales son adecuados para la modelización de placas, las hipótesis que respaldan este hecho se ponen en cuestión cuando el espesor de la placa va en aumento. El espesor de la pala de pádel presenta una magnitud comparable y no despreciable respecto a las otras dos direcciones. Esto justifica la elección de elementos tipo sólido.

Por otro lado, este TFG se encuentra enmarcado dentro de una línea de estudio de correlación numérico-experimental de problemas de impacto no lineal en sistemas multimateriales llevada a cabo por Germán Castillo López y Felipe García Sánchez tutor y cotutor de este TFG. Con idea de continuar el análisis comenzado en este trabajo se opta por la utilización de este tipo de elementos porque son los únicos que soportan la tarjeta MATD185 para definición de elementos cohesivos utilizados para simulación del fallo interlaminar en materiales laminados.

Destacar que para el caso concreto de la solución no lineal explícita, únicamente puede usarse la configuración de ocho nodos, situados estos en los vértices.

Tabla 8-5 Elemento CHEXA8

Elemento	Dimensión	Número de Nodos	Esquema gráfico
CHEXA8	3D	8	

Se ha utilizado integración completa, definida por la tarjeta PSOLIDD (ver capítulo 7, apartado 4.7 Definición del elemento), para evitar problemas derivados de la energía de hourglass.

3 Proceso de convergencia

En el proceso de convergencia se ha utilizado la siguiente nomenclatura para nombrar a cada simulación: L n1 R n2 N n3. “L” hace referencia a las divisiones en la dirección del espesor de las pieles, “R” a las divisiones de la probeta en dirección radial y “N” a las divisiones del núcleo en la dirección del espesor.

3.1 Convergencia del mallado del espesor del núcleo

Se fijan el tamaño y número de elementos de la esfera y de los anillos.

Se fija el tamaño de los elementos de la probeta en la dirección radial.

Se fija el tamaño del elemento en la dirección del espesor para las pieles.

Se varía el tamaño del elemento en la dirección del espesor de la probeta, pero solo en la zona correspondiente al núcleo.

Tabla 8-6 Convergencia del mallado del espesor del núcleo.

Simulación	Nºelementos	Fuerza Máxima (N)
L2R40N5	55296	1405,3
L2R40N10	86016	1415,1
L2R40N20	147456	1420
L2R40N30	208896	1415,7
L2R40N40	270336	1417,2

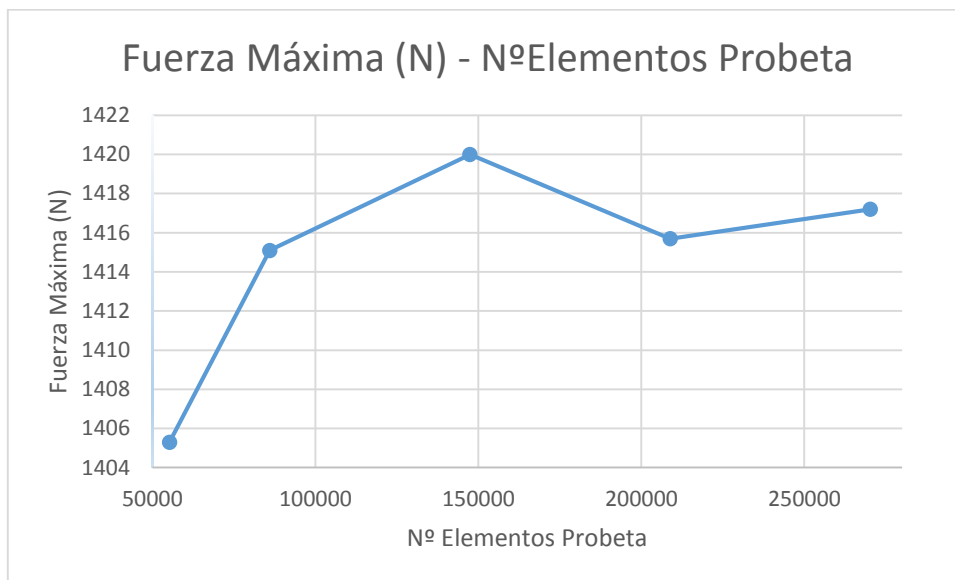


Figura 8.3 Convergencia del mallado del espesor del núcleo.

Las variaciones en el resultado son inferiores al 1%, tomando como referencia la de la malla más fina. Se ha optado por el modelo L2R40N10 para continuar con el proceso de convergencia, se ha elegido este y no el L2R40N5 porque la forma de los elementos en L2R40N10 se encuentra menos deformada, siendo prácticamente cubos.

3.2 Convergencia del mallado del radio de la probeta

Se fijan el tamaño y número de elementos de la esfera y de los anillos.

Se fija el tamaño del elemento en la dirección del espesor para el núcleo.

Se fija el tamaño del elemento en la dirección del espesor para las pieles.

Se varía el tamaño del elemento en la dirección radial de la probeta.

Tabla 8-7 Convergencia del mallado del radio de la probeta

Simulación	Nº elementos	Fuerza Máxima (N)
L2R10N10	5376	1737
L2R30N10	48384	1501,6
L2R40N10	86016	1415,1
L2R50N10	134400	1385,1

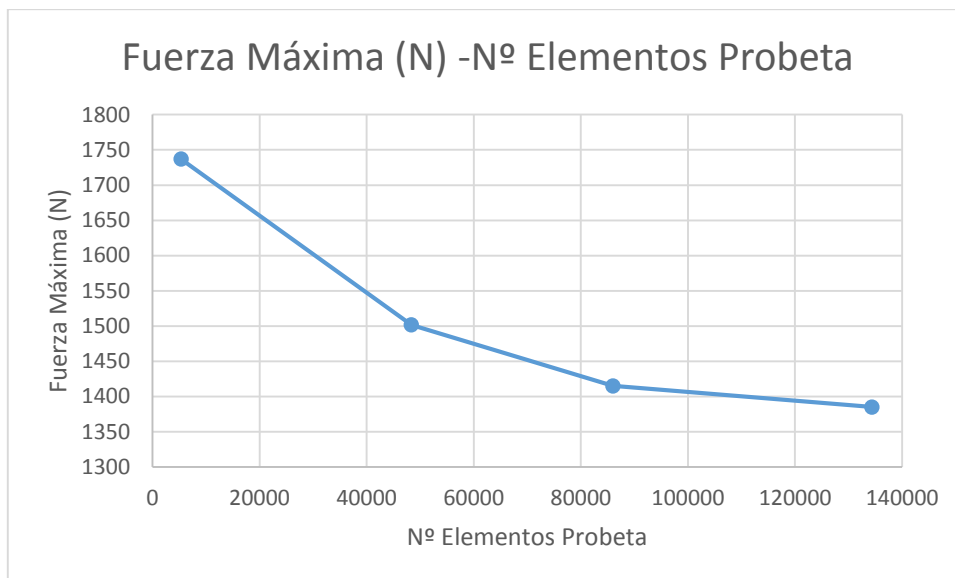


Figura 8.4 Convergencia del mallado del radio de la probeta.

Se puede observar como el valor de la fuerza tiende a mantenerse constante a partir de L2R40N10 con un valor de 1415,1 N. Se opta por este modelo porque solo presenta una variación en el valor de la fuerza del 2% respecto al L2R50N10 que representa un aumento del 36% en número de elementos.

3.3 Convergencia del mallado del espesor de la piel

Se fijan el tamaño y número de elementos de la esfera y de los anillos.

Se fija el tamaño del elemento en la dirección del espesor para el núcleo.

Se fija el tamaño del elemento en la dirección radial de la probeta.

Se varía el tamaño del elemento en la dirección del espesor para las pieles.

Tabla 8-8 Convergencia del mallado del espesor de la piel.

Simulación	Nº elementos	Fuerza Máxima (N)
L1R40N10	75722	1402,3
L2R40N10	88010	1415,1
L3R40N10	100298	1416,3

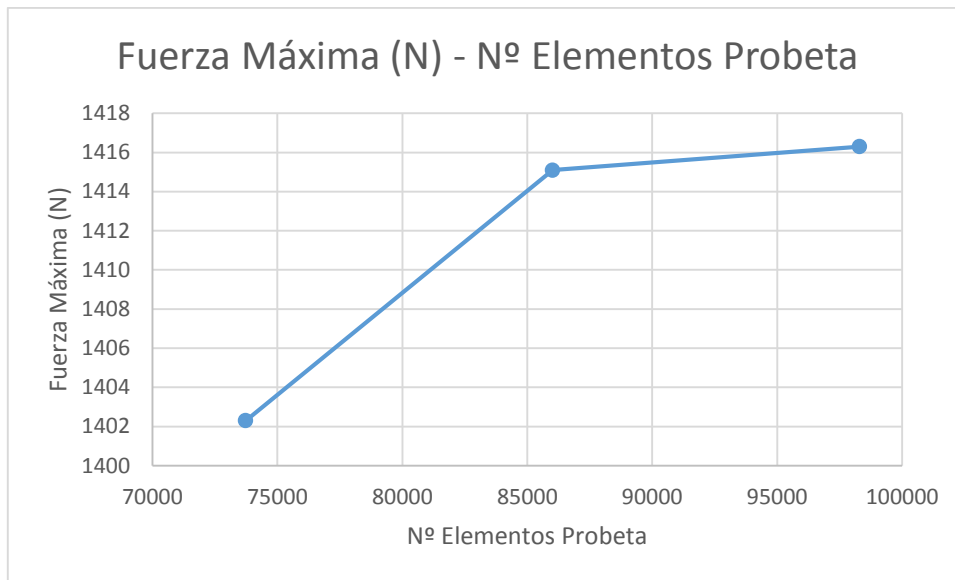


Figura 8.5 Convergencia del mallado del espesor de la piel.

Las variaciones en el resultado son inferiores al 1%, tomando como referencia la de la malla más fina. Por este motivo, se ha optado por la malla L1R40N10 que da lugar a elementos con una relación de forma más próxima a la unidad.

3.4 Convergencia del mallado de los anillos de contactos

Se toma como referencia el modelo seleccionado L1R40N10, se mantiene el número de elementos de la esfera y se varía el de los anillos.

Tabla 8-9. Convergencia del mallado de los anillos de contactos

Simulación	Nº elementos	Fuerza Máxima (N)
Grueso	40	1412,6
Normal	330	1402,3
Fino	13200	1399,6

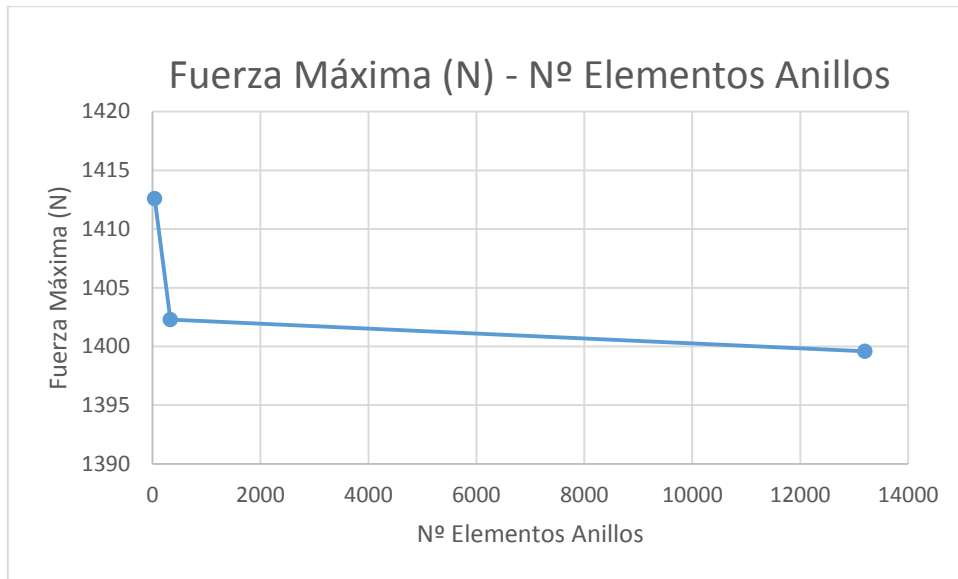


Figura 8.6 Convergencia del mallado de los anillos de contactos

Las variaciones en el resultado son inferiores al 1%, tomando como referencia la de la malla más fina. Por este motivo, se ha optado por el mallado normal porque da lugar a elementos con una relación de forma más próxima a la unidad.

3.5 Convergencia del mallado de la esfera

Se toma como referencia el modelo seleccionado L1R40N10, se mantiene el número de elementos de los anillos y se varía el de la esfera.

Tabla 8-10 Convergencia del mallado de la esfera

Simulación	Nºelementos	Fuerza Máxima (N)
Grueso	1664	1402,3
Normal	14845	1409,1
Fino	48384	1417,3

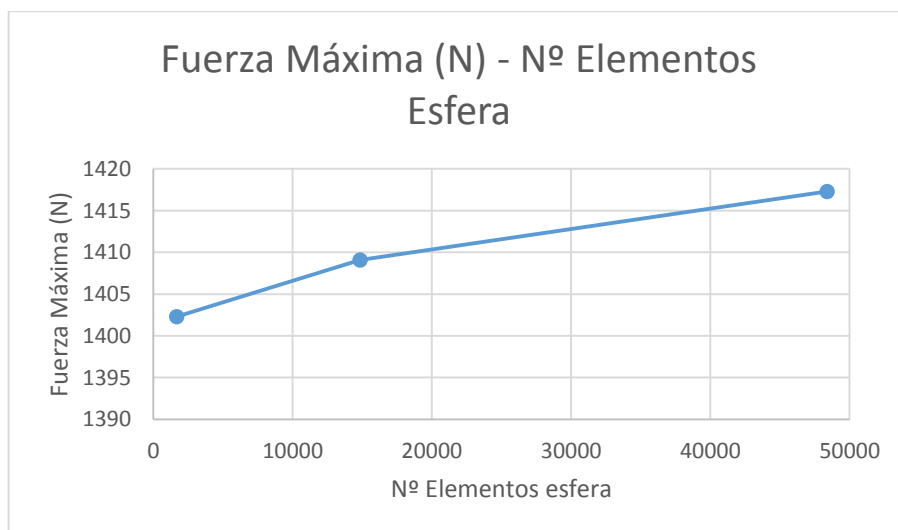


Figura 8.7 Convergencia del mallado de la esfera

Las variaciones en el resultado son inferiores al 2%, tomando como referencia la de la malla más fina., posiblemente motivada por el hecho de que en el peor de los casos los elementos son de un tamaño muy similar a los de la probeta, por esta razón se opta por la esfera de mallado grueso.

3.5.1 Modelo final

Finalmente se llega al modelo L1R40N10, con esfera de mallado grueso (1664 elementos) y los anillos con mallado normal (330 elementos).

4 Estudio de influencia de material

4.1 Piel

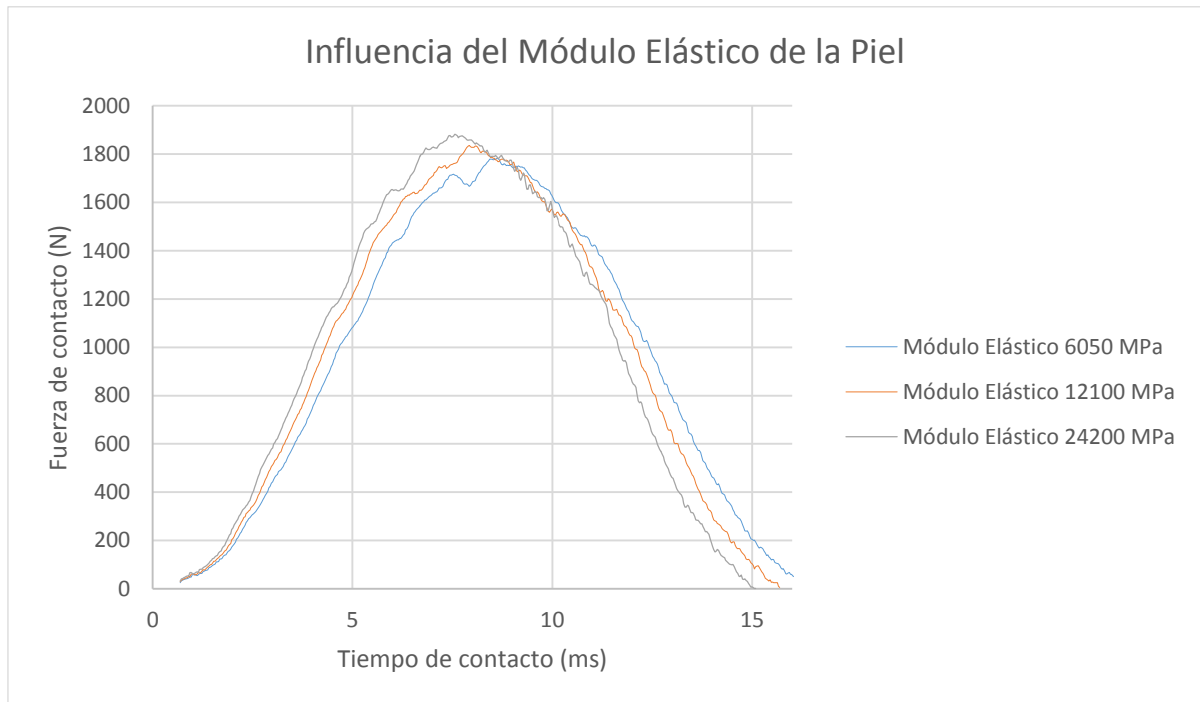


Figura 8.8 Influencia del Módulo Elástico de la Piel.

4.2 Núcleo

4.2.1 Influencia del módulo elástico del núcleo

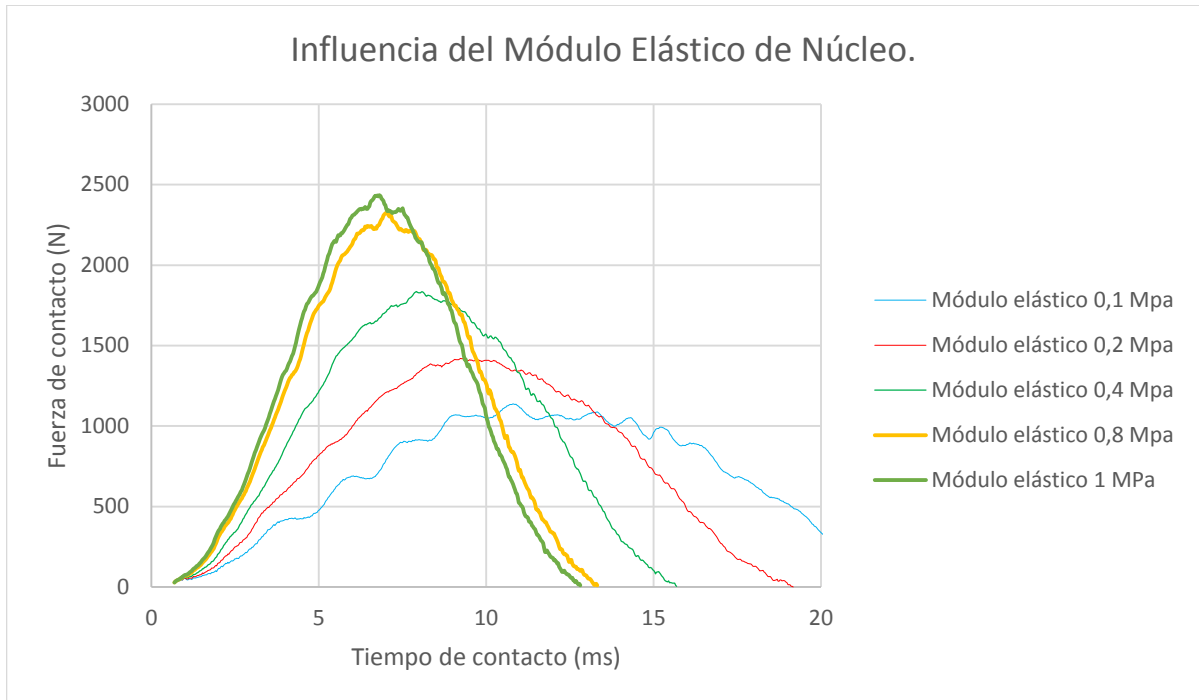


Figura 8.9 Influencia del Módulo Elástico de Núcleo.

4.2.2 Influencia del coeficiente de Poisson

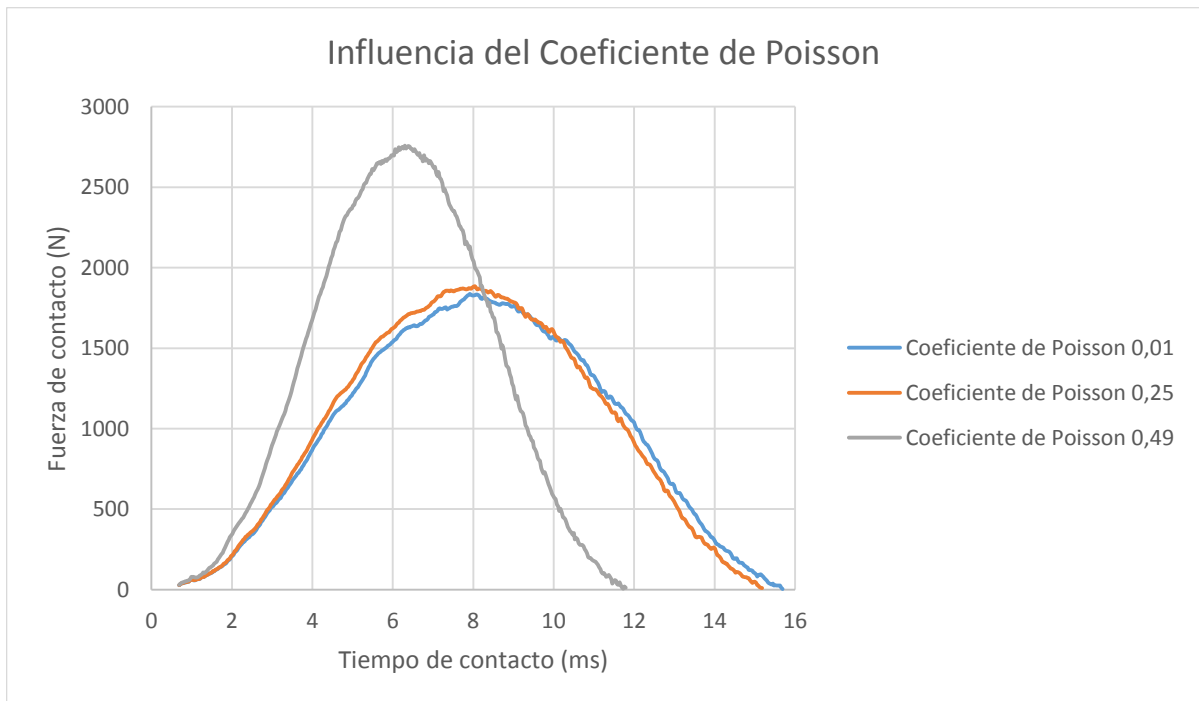


Figura 8.10 Influencia del Coeficiente de Poisson.

5 Conclusiones

Según se puede observar en la figura 8.8 “Influencia del Módulo Elástico de la Piel” una variación del 100% del módulo elástico de la piel respecto al módulo elástico tomado como referencia supone una variación inferior al 3% en la fuerza máxima de contacto. Mientras que una variación del mismo orden respecto al módulo elástico de la espuma (ver figura 8.9) supone un cambio significativo en la fuerza de contacto máxima.

Por otro lado, se puede observar en la figura 8.10 como la influencia de la variación del coeficiente de Poisson de la espuma entre 0,01 y 0,25 es despreciable, pero significativa en comparación con un coeficiente de Poisson de 0,49.

Capítulo 9 Correlación numérico-experimental

1 Introducción

En este capítulo se comparan los resultados de un impacto experimental realizado en la máquina de ensayos CEAST 9350 sobre la pala de pádel Marvel y los resultados obtenidos de la simulación del mismo mediante MEF.

2 Impacto experimental

El ensayo de impacto se realiza en la máquina de impactos CEAST 9350. Se utiliza un impactador esférico cuya masa equivalente es de 2410g. El impactador golpea por caída libre la pala de pádel Marvel, sin agujeros, en la parte central de la zona de golpeo alcanzando una velocidad de 3 m/s; poniendo en juego una energía total de 11J.

La pala de pádel es colocada entre dos piezas de sujeción que generan una presión sobre ella de 0,2 bares para mantenerla en su posición.

3 Comparación

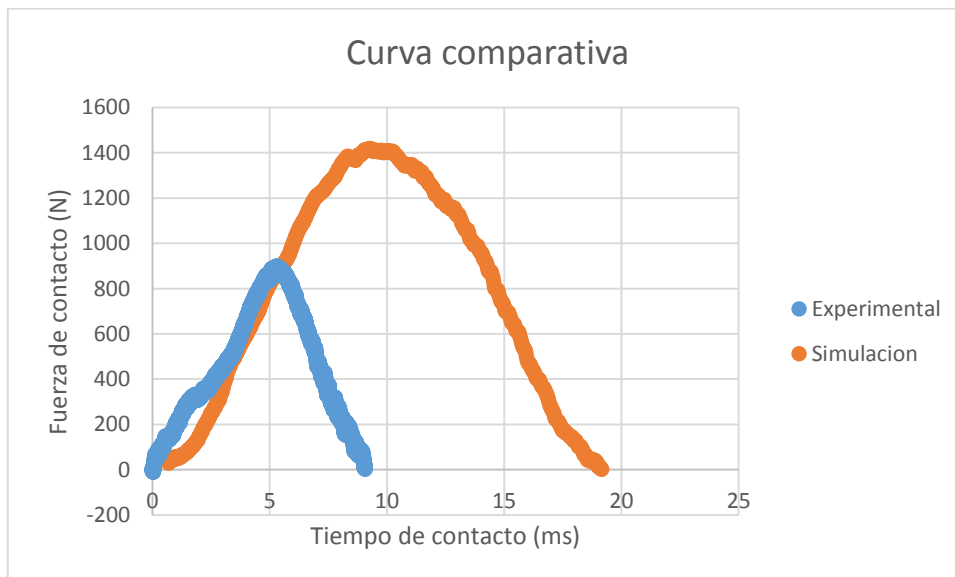


Figura 9.1 Comparación curva experimental y curva de simulación.

Se puede observar como el modelo de la simulación es mucho más rígido que el del ensayo experimental, porque se alcanza un pico en la fuerza de contacto mayor.

4 Análisis de discrepancias

1. Fuentes de incertidumbre en las propiedades de los materiales.
 - a. El propio procedimiento artesanal de fabricación, puede provocar ciertas discrepancias entre los materiales de los que se han extraído las probetas para la determinación de las propiedades mecánicas y los materiales que constituirían las palas ensayadas. Destacar que en el proceso de fabricación de la pala la introducción de aire en el cuerpo de la misma provoca cierto compactado de las pieles (cosa que no ocurre con las probetas fabricadas, donde no se aplica ningún compactado).
 - b. Los ensayos de caracterización de cada uno de los materiales conllevan sus propias fuentes de incertidumbre, que consideramos de menor importancia por tratarse de procedimientos que permiten un control más exhaustivo.
 - c. El procedimiento de estimación de las propiedades del material compuesto a partir de las propiedades de los componentes es un procedimiento aproximado.
 - d. El análisis del complejo comportamiento de la espuma polimérica también aparece como una fuente de incertidumbre que puede considerarse de cierta relevancia
2. Probablemente la mayor fuente de discrepancias deba de ser asociada a la simplificación de la geometría en el modelo numérico. El mayor volumen de la pala de pádel real hace que sea capaz de disipar mayor cantidad de energía que el volumen modelizado en el cálculo numérico. Se disipa una gran cantidad de energía en forma de vibración de la parte de la pala que se encuentra fuera de zona modelizada
3. Falta de sujeción de pala ensayada durante el impacto real. En el vídeo de alguno de los ensayos se puede observar como la pala es capaz de desprenderse de los discos que la fijaban. Esto hace menos rígido el sistema real que el sistema considerado en el modelo numérico.
4. En el modelo numérico no se han tenido en cuenta los fenómenos de fricción. Aunque su consideración resulta aconsejable, en este nivel del estudio se han desestimado por considerar de escasa importancia su aportación durante los tiempos de impacto.
5. Especial mención en la simplificación del modelo merece la no consideración del marco de la pala. Resulta obvio que su diseño puede tener una influencia considerable en la rigidez del conjunto. Su consideración ha quedado fuera del alcance de este trabajo, pero, indudablemente, es una de las líneas en las que habrá que seguir trabajando

5 Conclusiones

En vista de los resultados obtenidos se puede llegar a las siguientes conclusiones.

- El modelo numérico es más rígido que la pala real estudiada. Esto puede estar motivado por la disipación de energía en forma de vibración que se produce a lo largo de la pala, marco y mango que no han sido considerados en el modelo numérico.
- Existe un importante grado de incertidumbre respecto a las propiedades de los materiales, motivada principalmente por el proceso de fabricación artesanal de las probetas, que además no es exactamente igual al proceso real (la introducción de aire en el cuerpo de la pala provoca cierto compactado de las pieles (cosa que no ocurre con las probetas fabricadas, donde no se aplica ningún compactado)).

- Hay que trabajar en la línea de incrementar la complejidad del modelo tratando de simular una situación cada vez más real
- Una posible solución que simplificaría el problema sería cortar la probeta de ensayo por el centro de la zona de golpeo, eliminando la influencia del resto de partes de la pala, marco, mango, etc.
- Para realizar el modelo numérico de la forma más próxima a la realidad, sería interesante buscar la forma de sujetar la probeta de forma que se pueda considerar empotrada en su perímetro, simplificando de esta forma el modelo.
- En cualquier caso, el objetivo de este modelo numérico no era simular el comportamiento de la pala completa, si no disponer de un modelo numérico lo suficientemente simple como para poder comparar la influencia de la utilización de otros materiales (carbono, kevlar,...), núcleos diferentes, diferentes espesores,... que permita tomar decisiones para diseños futuros.
- La razón fundamental para no haber hecho un modelo de la pala completa es el elevado número de variables que se introducen y que en muchos casos se desconocen. El más importante de ellos la forma real que adquiere el tubo que forma el marco y mango de la pala.

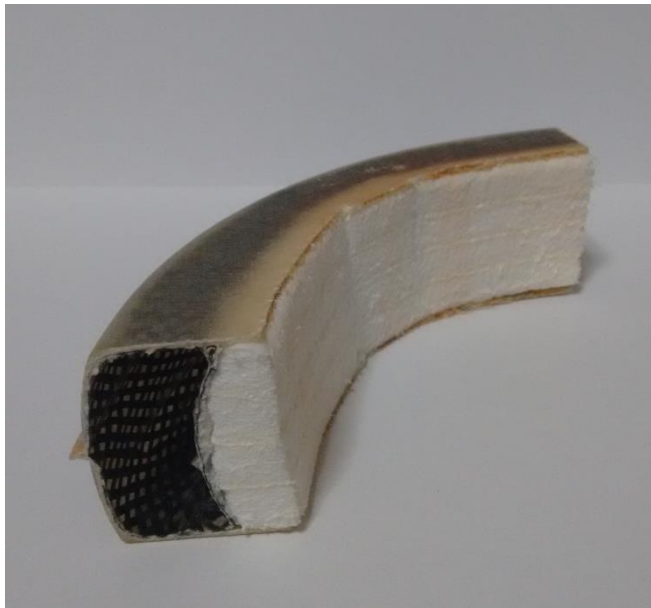


Figura 9.2 Marco de la pala de pádel.

Capítulo 10 Conclusiones

- Importancia de la relación universidad empresa en el marco cooperativo y de desarrollo. Gracias a estudios de investigación y desarrollo llevados a cabo por la universidad, la empresa puede mejorar sus productos y como consecuencia ser más competitiva en el mercado.
- Importancia de los modelos numéricos. El desarrollo de un modelo numérico adecuado capaz de simular el comportamiento de un producto real es vital para el desarrollo y mejora de dicho producto. Gracias a las simulaciones por ordenador se puede comprobar como varía el comportamiento del producto realizando cambios sobre el mismo, pero sin llevarlos a cabo de forma real, algo que sería excesivamente costoso.
- Importancia de los ensayos de caracterización. Conocer el comportamiento del material que forma el producto resulta de gran importancia para entender su respuesta frente a sollicitaciones externas. Además, conocer las propiedades del material permite realizar modelos numéricos más precisos y cercanos a la realidad.
- Comportamiento viscoelástico de las espumas poliméricas. Muestran variación en su comportamiento en función de la velocidad de deformación que experimentan.
- Importancia del porcentaje de fibra en volumen de materiales compuestos.
- Se ha presentado un método para estimar propiedades de materiales compuestos mediante el uso de la Micromecánica.
- Con el desarrollo de este TFG se ha realizado la primera toma de contacto con la máquina de impactos CEAST 9350. Esta primera toma de contacto facilitará la tarea de los trabajos futuros que se realicen con ella.
- Se ha creado un utillaje específico para la realización de este TFG, pero que puede ser utilizado en trabajos futuros por su alto grado de versatilidad.
- Este TFG ha continuado con línea de investigación llevada a cabo por mi tutor Germán Castillo López y mi cotutor Felipe García Sánchez sobre la correlación numérico experimental de problemas de impacto no lineal en sistemas multimateriales. Se ha presentado al post procesador LS-PrePost como una importante herramienta para la obtención de los resultados generados por Nastran. También se ha mejorado el proceso de modelización, sentando las base para la utilización de elementos cohesivos con el fin de simular el fallo interlaminar en trabajos futuros.
- Se ha comprobado el alto grado de repetitividad en la respuesta de las palas de pádel Marvel frente a sollicitaciones de impacto, a pesar de ser fabricadas de forma manual.

- Se ha desarrollado un modelo numérico que permite analizar la influencia de parámetros tales como: materiales, porcentajes de fibra, espesores, etc. en el comportamiento del sándwich que forma la pala de pádel.
- En el caso de que queramos simular el comportamiento global de la pala de pádel, será necesario realizar un modelo más complejo con mayores incertidumbres asociadas a un mayor número de variables y a la influencia de las incertidumbres generadas por la falta de control del proceso de fabricación.

Capítulo 11 Líneas futuras

En el momento en que se encuentra el presente trabajo aparecen como líneas de desarrollo natural las siguientes:

- Introducción de elementos cohesivos para el estudio del fallo interlaminar del laminado de la piel de la pala de pádel Marvel.
- Simplificación del ensayo de impacto experimental reduciendo el número de variables y complejidad de las mismas. Se propone cortar la probeta de estudio del centro de la zona de golpeo de la pala de pádel, aislando al material de esta forma de la influencia del marco de la pala y del mango.
- Realizando el mismo control de calidad establecido en este TFG para las palas Marvel, aplicarlo para estudiar la influencia del tamaño, número y distribución de los agujeros sobre la pala.
- Estudiar en profundidad el comportamiento del núcleo de la pala Marvel, constituido por espuma polimérica.
- Realizar un modelo completo de la pala y compararlo con un ensayo que sea más representativo del comportamiento global de la pala.

Es muy probable que cualquiera de estas líneas propuestas, y las que se vayan generando en su desarrollo, den lugar a trabajos de complejidad semejante, sino superior, a la del presente trabajo. En cualquier caso, este trabajo supone el punto de partida necesario para cualquiera de ellas.

Capítulo 12 Bibliografía

ANSYS. 2012. *ANSYS LS-DYNA User's Guide Release 14.5.* 2012.

Báez Leva, J. 2014. *Análisis numérico de impacto no lineal en sistemas multicomponente.*: Proyecto Fin de Carrera Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial. Universidad de Málaga, 2014.

Beltrán, F. 1998-1999. *Teoría general del método de elementos finitos.* : E.T.S. Ingenieros Industriales Universidad Politécnica de Madrid, 1998-1999.

Bouix, Remy y Viot Jeu-Luc Lataillade, Philippe. 2008. *Polypropylene foam behaviour under dynamic loading: Strain rate, density and microstructure effects.* 2008.

Burgos de la Rosa, Ismael. 2015. *Simulación de impacto sobre materiales compuestos laminados.* Málaga, 2015.

Castillo López, Germán. 2013. *Introducción a los materiales compuestos de matriz orgánica. Diseño, ensayo y fabricación.* 2013.

Doelfs, P. y Dr. Neubauer, I. 2004. *Using MSC.Nastran for Explicit FEM Simulations.* MSC Software GmbH. . 2004.

F. Ashby, Michael y R.H. Jones, David. 1998. *Engineering Materials 2, An Introduction to Microstructures, Processing and Design.* 1998.

F.I.P, Federación Internacional de Pádel. 2008. *Reglamento de juego del pádel.* Calgary, 2008.

Goicolea, J.M. 2012-2013. *Estructuras sometidas a impacto:* E.T.S Ingenieros de Caminos Universidad Politécnica de Madrid, 2012-2013.

ITW Test and Instrument Italia S.r.l-INSTRON CEAST Division. *Visual Impact, Instruction Manual.* Italia, 2014.

Mesa Castro, Pablo Antonio. 2014. *Simulación de impacto de baja energía mediante el método de los elementos finitos.* 2014.

Mora Serrano, David. Consultado en 2016. *www.webconsultas.com.* Consultado en 2016. <http://www.webconsultas.com/ejercicio-y-deporte/material-deportivo/como-elegir-la-pala-de-padel-adecuada-14616>.

MSC Nastran, 2014c. Quick reference guide. 2014c

MSC Software Corporation . 2012. *Explicit nonlinear user's guide. Revision 1.* 2012.

MSC Software Corporation. 2011. *An introductory guide to nonlinear analysis.* 2011.

Navarro, Carlos. Consultado 2016. *Teoría Clásica de laminados.* Consultado 2016.

París Caballero, Federico, Cañas Delgado, José y Marín Vallejo, Juan Carlos. 2006. *Introducción al análisis y diseño con materiales compuestos.* Sevilla, 2006.

Sánchez-Alcaraz Martínez, Bernardino J. 2013. *Tema 2; Instalaciones y equipamiento deportivo en pádel.* Universidad de Murcia, 2013.

Think Composites. 1991. *Notice d'Utilisation des Logiciels.* 1991.

Zabala Rodriguez, Haritz. 2014. *Influencia de la velocidad de impacto en la delaminación generada por impactos transversales de baja velocidad en tejidos carbono-epoxi. Dependencia del comportamiento interlaminar del composite a la velocidad de propagación de grieta.* 2014.

Anexo A Manual de LS-PrePost

1 Introducción

Este anexo pretende ser una herramienta útil para el estudiante que quiera continuar con el desarrollo de este TFG. Este manual trata sobre la visualización de los resultados obtenidos del cálculo realizado por Nastran en LS-PrePost.

2 Cargar resultados.

La secuencia para cargar los resultados generados por Nastran es la siguiente:

File < Open < LS-DYNA Binary Plot < Archivo D3PLOT

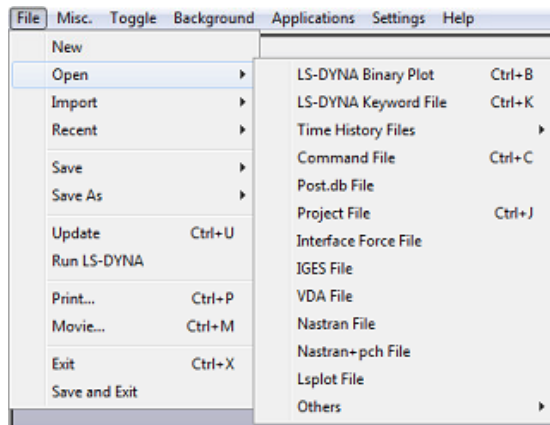


Figura A.3 Cargar archivo D3PLOT en LS-PrePost

Una vez cargado el archivo D3PLOT se cargan los resultados, para ello marcar las casillas “2” y “Binout” del menú lateral:

CFD	Cgat	Stereo
Binout	Skid	AleMat
Subsys	PTravel	PTrim
Renum	Refchk	MatDB
ElGen	Detach	
ElEdit	Curves	Offset
Movcpy	DupNod	Normals
Trnsfrm	Reflect	Project
Transit	Rotate	Scale
1	2	3
4	5	6
7	D	

Figura A.4 Menú 2

En la parte inferior izquierda de la pantalla aparece el botón “Load”, que nos permite cargar el archivo BINOUT0000, una vez esté seleccionado debe aparecer en la pantalla “Open files” la

dirección del archivo, seleccionándola, aparece en el recuadro de la derecha los resultados “Time History Request” que seleccionamos en Patran (ver capítulo 7 apartado 4.8 Análisis).

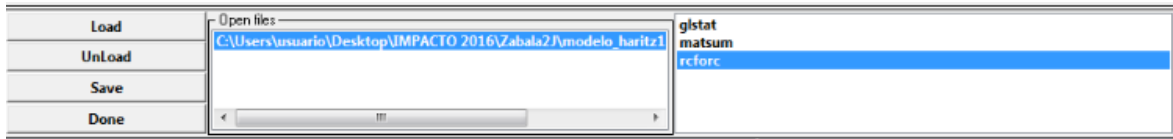


Figura A.5 Selección de resultados "Time History Request"

3 Visualización de resultados

Algunos de los resultados más interesantes para observar son: Fuerza de contacto, velocidad, energía cinética, zona delaminada, etc.

3.1 Fuerza de contacto

Se selecciona la opción “rcforc” y en la zona “BINOUT file operations” se configura la información a la que se quiere acceder.

En este caso, se quiere observar la fuerza a la que es sometida la esfera durante el impacto, para ello se selecciona “z_force” y “s-1”. A continuación se genera el gráfico deseado pulsando el botón “Plot”.

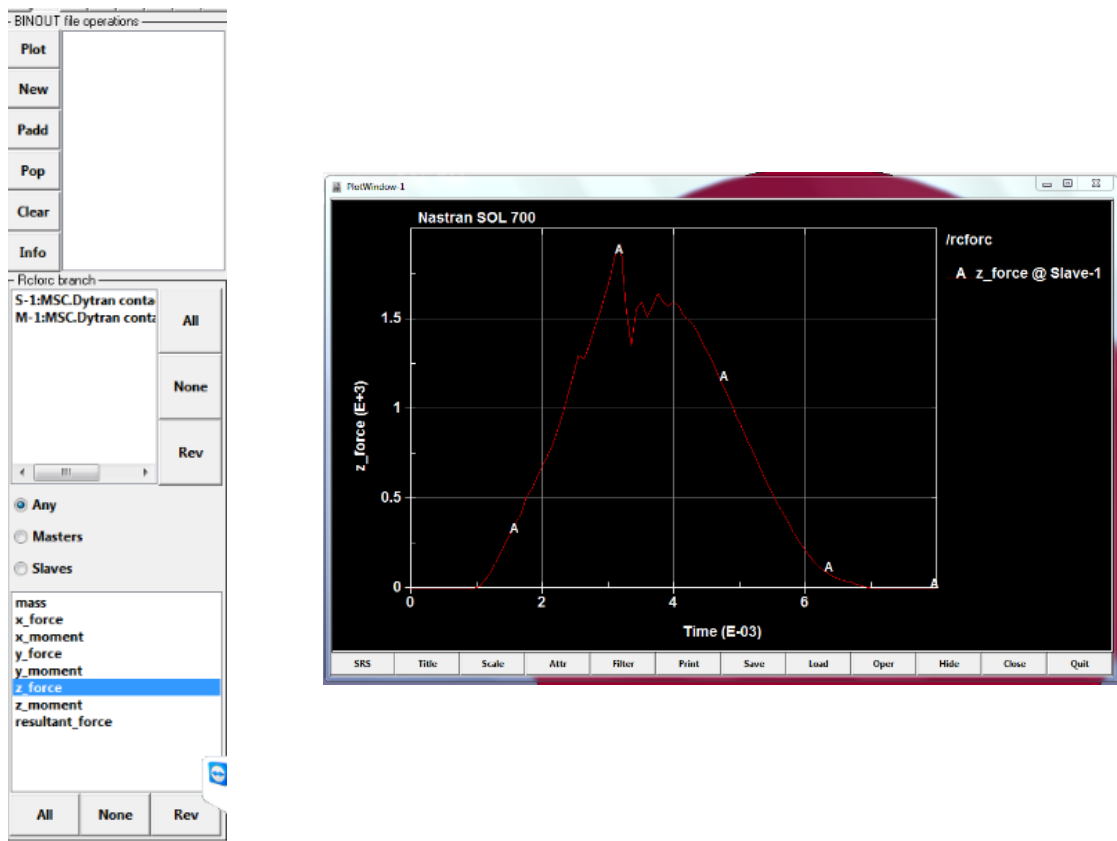


Figura A.6 Visualización de la fuerza de contacto.

En la parte inferior del gráfico aparecen pestañas de trabajo, las más interesantes son:

Caracterización y simulación del comportamiento ante impacto de estructuras compuestas tipo sándwich. Propuesta metodológica para un caso real: Pala de Pádel

- “Attr” Permite realizar modificaciones sobre el gráfico, cambiar la leyenda, incluir título, mostrar los valores máximos y mínimos, etc.
- “Save”: Permite guardar los resultados mostrados en el gráfico, ya sea como pares de valores X e Y o como la curva gráfica mostrada.
- “Oper:” Permite efectuar operaciones sobre la curva de resultados, se puede integrar, derivar, multiplicar por una constante, etc.

Siguiendo el mismo procedimiento se pueden visualizar:

- Velocidad del impactador: *matsum < z_rbvelocity*
- Energía de hourglass: *glstat < hourglass energy*
- Energía cinética: *matsum < kinetic_energy*

3.2 Zona delaminada

Si se utilizan elementos cohesivos como modo de simulación del fallo interlaminar, se puede cuantificar cuanto mide la zona delaminada mediante la variación del área de estos elementos. Se deben seguir los siguientes pasos:

1. Seleccionar los elementos cohesivos de la capa en la que se quiere visualizar la delaminación. En este caso se selecciona la capa de elementos cohesivos superior. casillas “I” y “SelPar” del menú situado en la parte superior derecha.

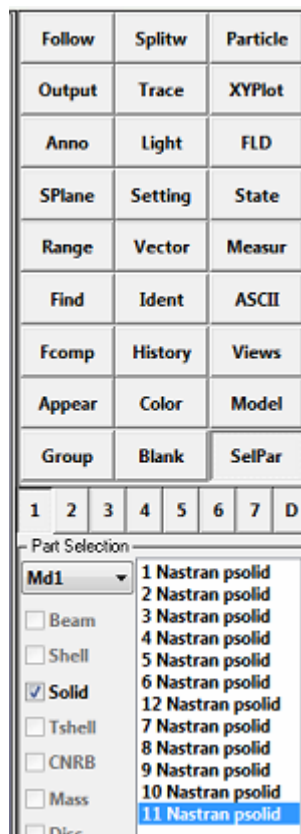


Figura A.7 Selección de los elementos objeto del estudio.

2. Visualizar el área de la capa de elementos seleccionados en el paso uno. Para ello seleccionar las casilla Measur y la opción Area en el desplegable Item

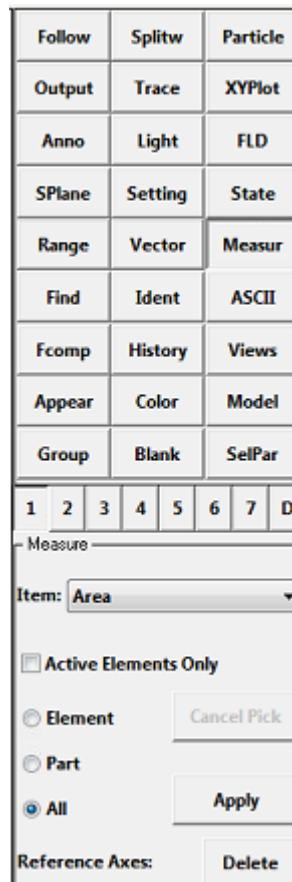


Figura A.8 Medición del área

Como se puede observar en la figura D.7 existe delaminación, porque existe pérdida de área de como consecuencia del fallo de los elementos cohesivos. Se puede observar como la caída del área coincide con el momento en el que la curva fuerza tiempo (figura D.4) presenta una caída.

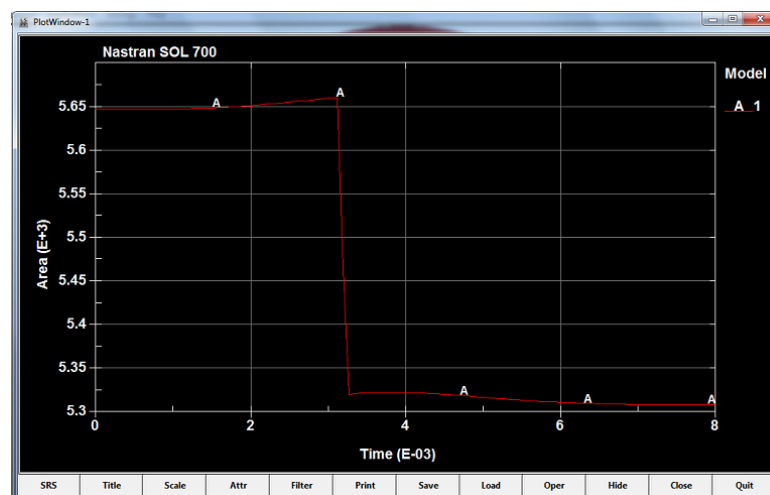


Figura A.9 Variación del área por delaminación

Anexo B Ensayos de tracción y cizalladura.

4 Ensayos de tracción

4.1 Ensayos de tracción probetas de fibra de carbono

Probeta 1

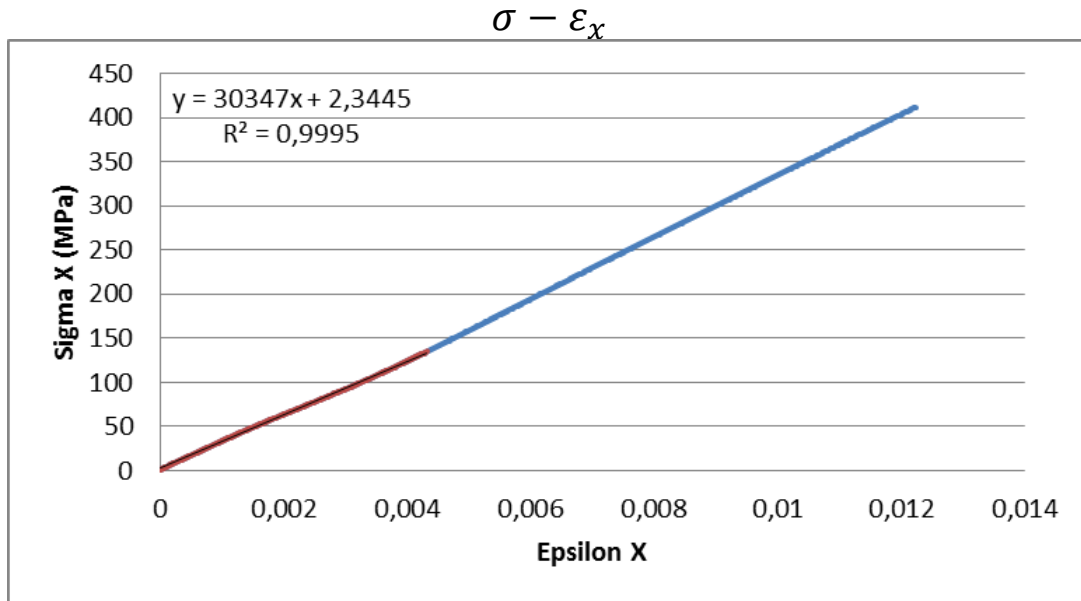


Figura B.10 Curva σ - ε ensayo de tracción probeta 1 fibra de carbono.

$$E_x = 30347 \text{ MPa}$$

$$X = 412 \text{ MPa}$$

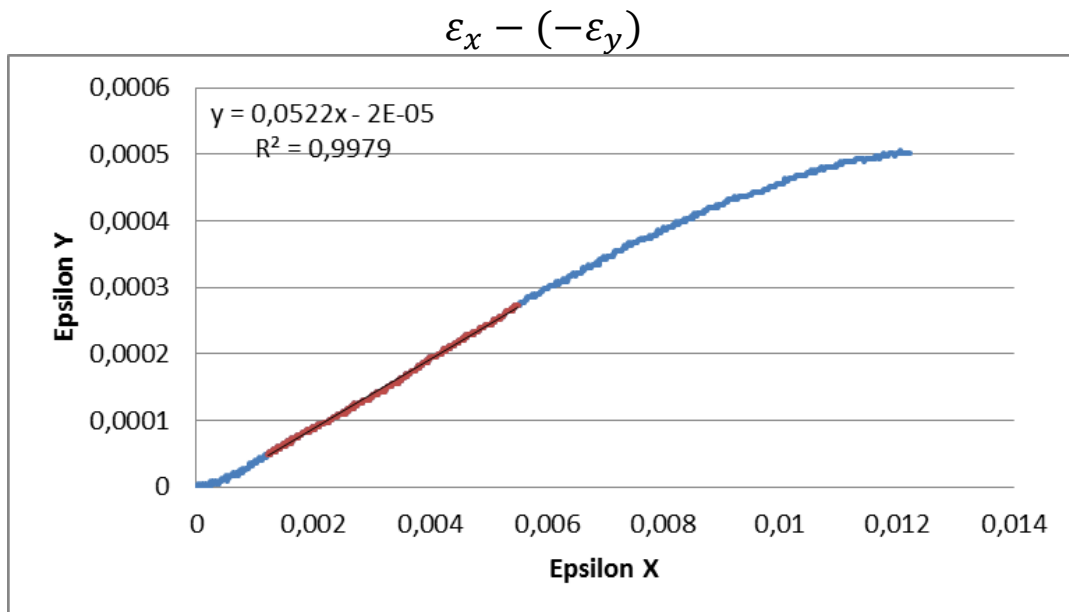


Figura B. 11 Curva $\varepsilon_x - (-\varepsilon_y)$ ensayo de tracción probeta 1 fibra de carbono.

$$\nu_{xy} = 0,05$$

Probeta 2

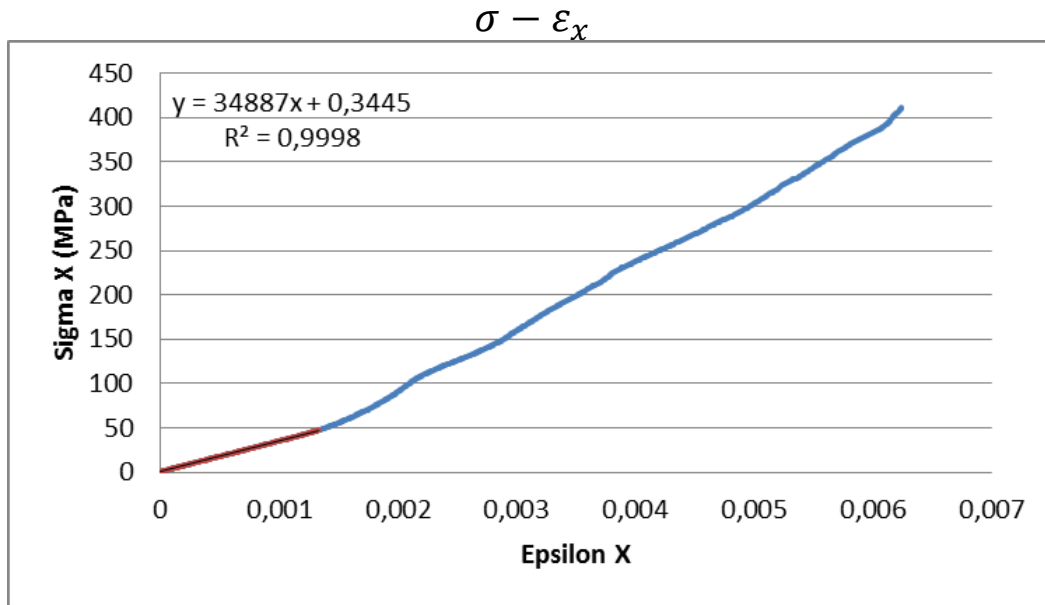


Figura B. 12 Curva σ - ϵ ensayo de tracción probeta 2 fibra de carbono.

$$E_x = 34887 \text{ MPa}$$

$$X = 411 \text{ MPa}$$

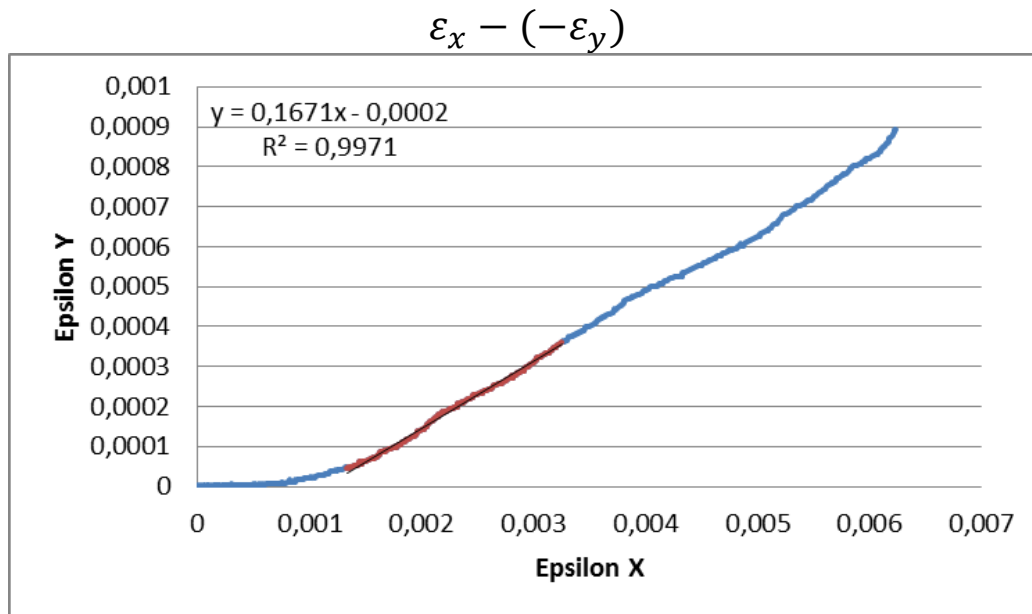


Figura B. 13 Curva $\epsilon_x - (-\epsilon_y)$ ensayo de tracción probeta 2 fibra de carbono.

$$\nu_{xy} = 0,17$$

Probeta 3

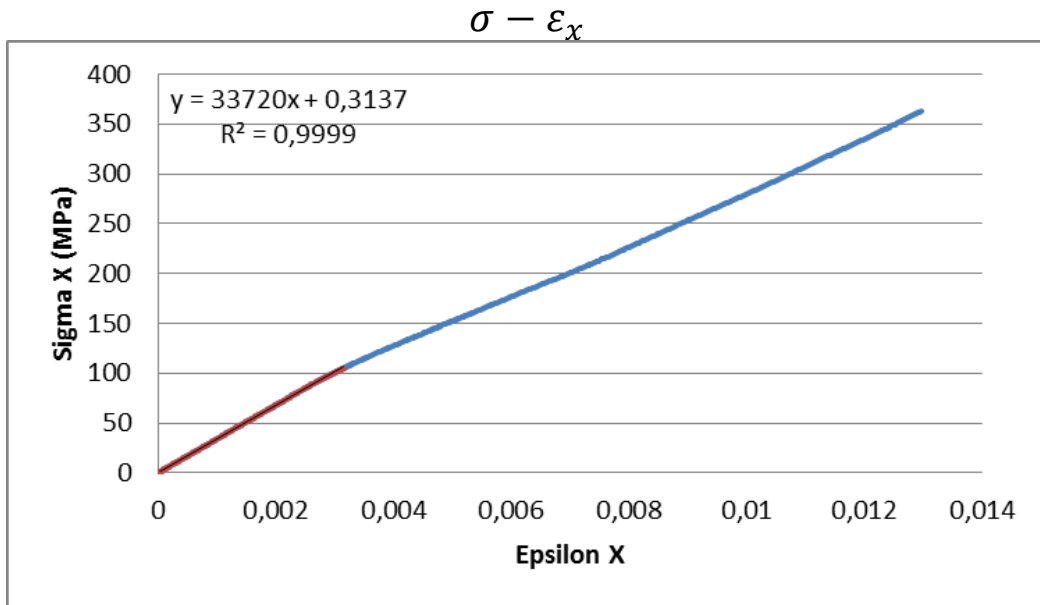


Figura B.14 Curva σ - ϵ ensayo de tracción probeta 3 fibra de carbono.

$$E_x = 33720 \text{ MPa}$$

$$X = 363 \text{ MPa}$$

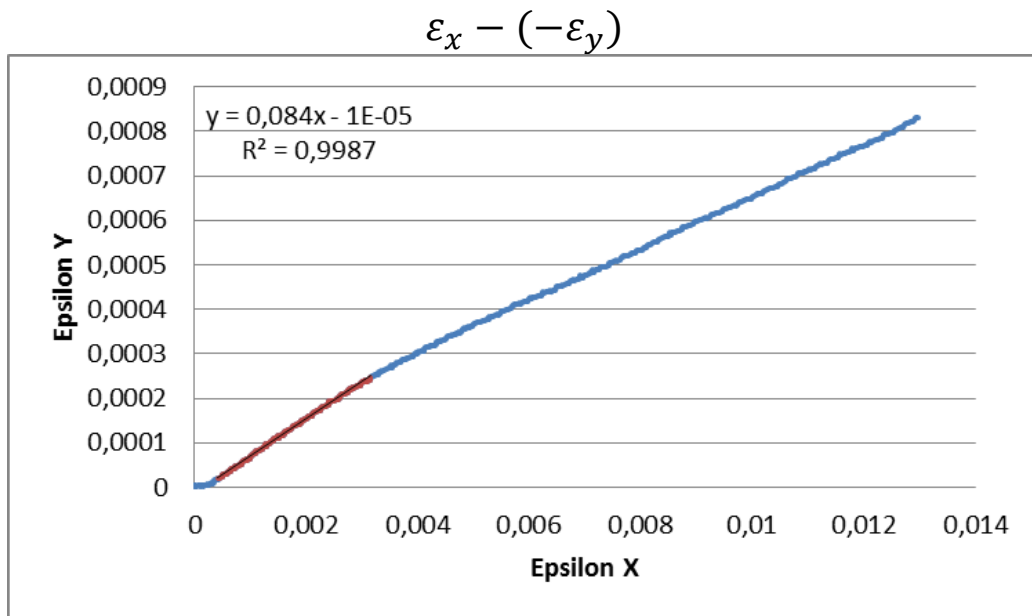


Figura B.15 Curva $\epsilon_x - (-\epsilon_y)$ ensayo de tracción probeta 3 fibra de carbono.

$$\nu_{xy} = 0,08$$

Probeta 4

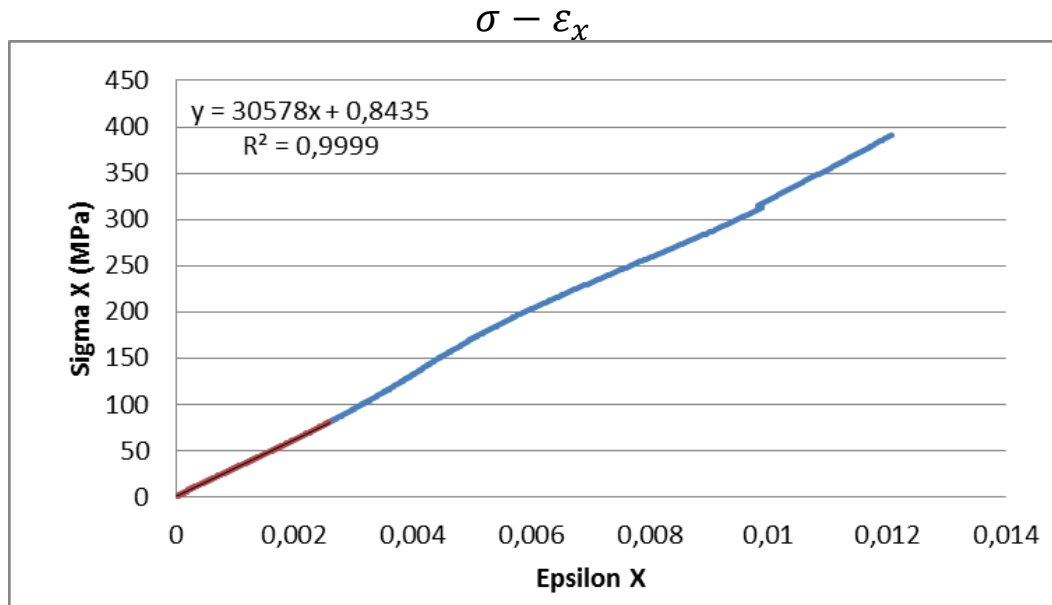


Figura B.16 Curva σ - ϵ ensayo de tracción probeta 4 fibra de carbono.

$$E_x = 30578 \text{ MPa}$$

$$X = 391 \text{ MPa}$$

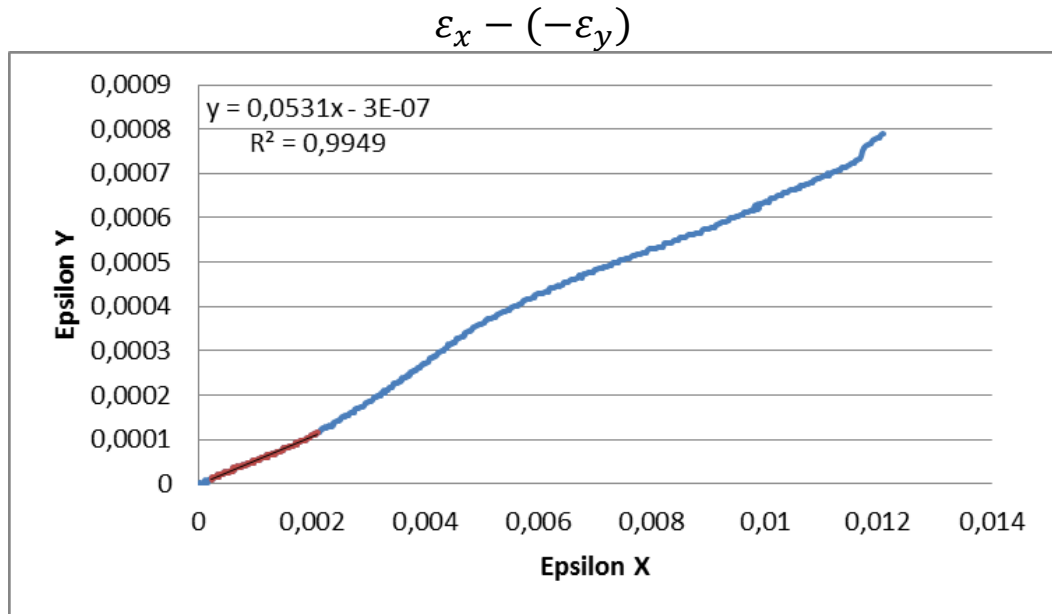


Figura B.17 Curva $\epsilon_x - (-\epsilon_y)$ ensayo de tracción probeta 4 fibra de carbono.

$$\nu_{xy} = 0,05$$

Probeta 5

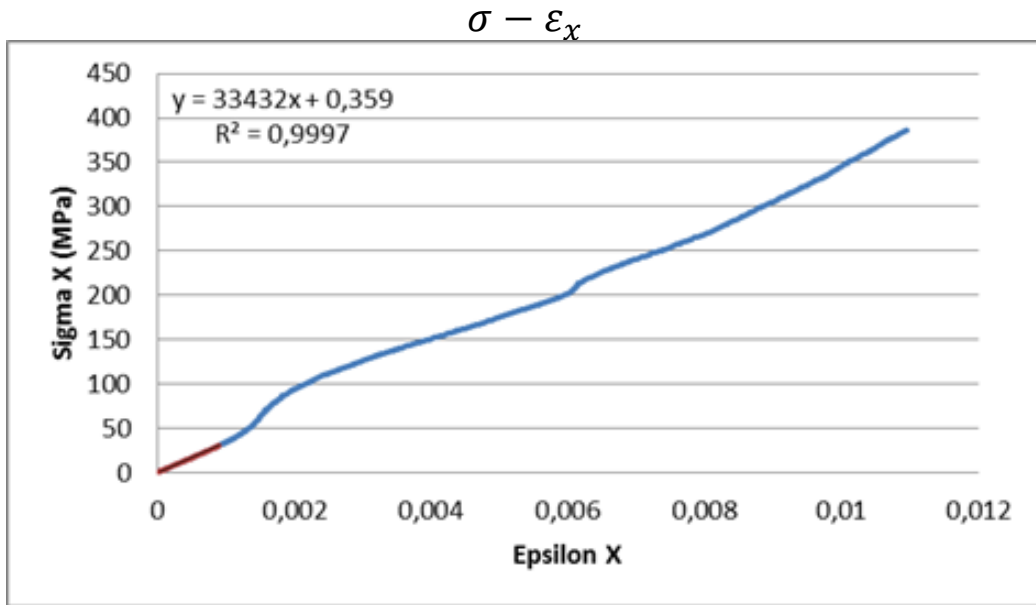


Figura B.18 Curva σ - ϵ ensayo de tracción probeta 5 fibra de carbono.

$$E_x = 33432 \text{ MPa}$$

$$X = 386 \text{ MPa}$$

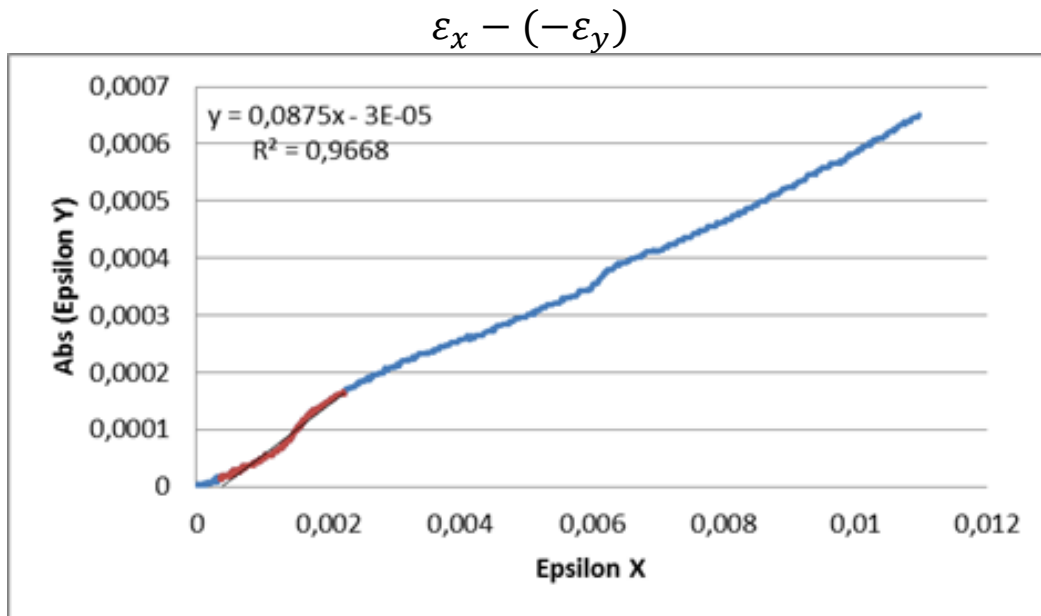


Figura B.19 Curva $\epsilon_x - (-\epsilon_y)$ ensayo de tracción probeta 5 fibra de carbono.

$$\nu_{xy} = 0,09$$

4.2 Ensayos de tracción probetas de fibra de vidrio

Probeta 1

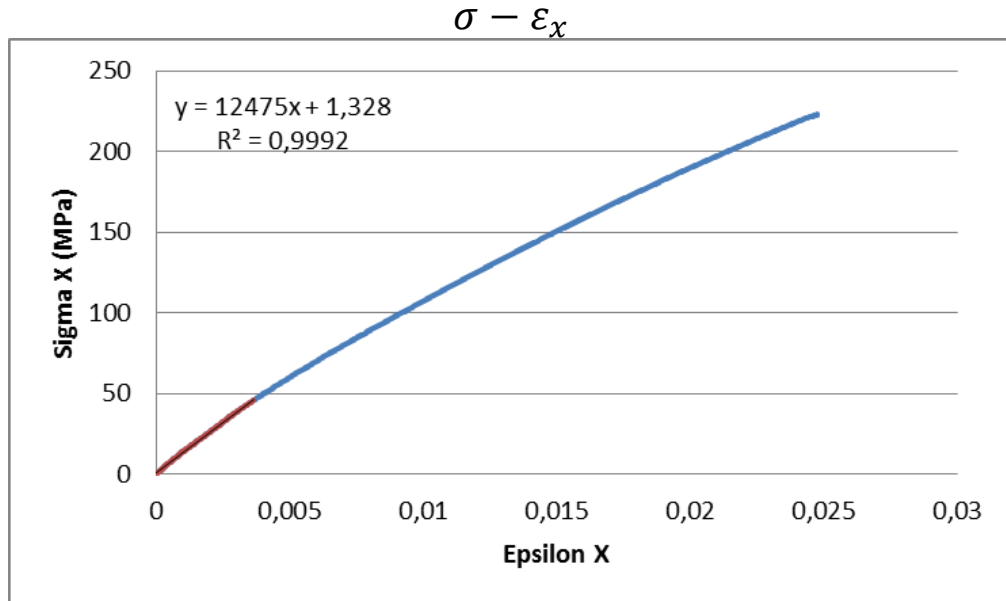


Figura B.20 Curva σ - ϵ ensayo de tracción probeta 1 fibra de vidrio.

$$E_x = 12475 \text{ MPa}$$

$$X = 223 \text{ MPa}$$

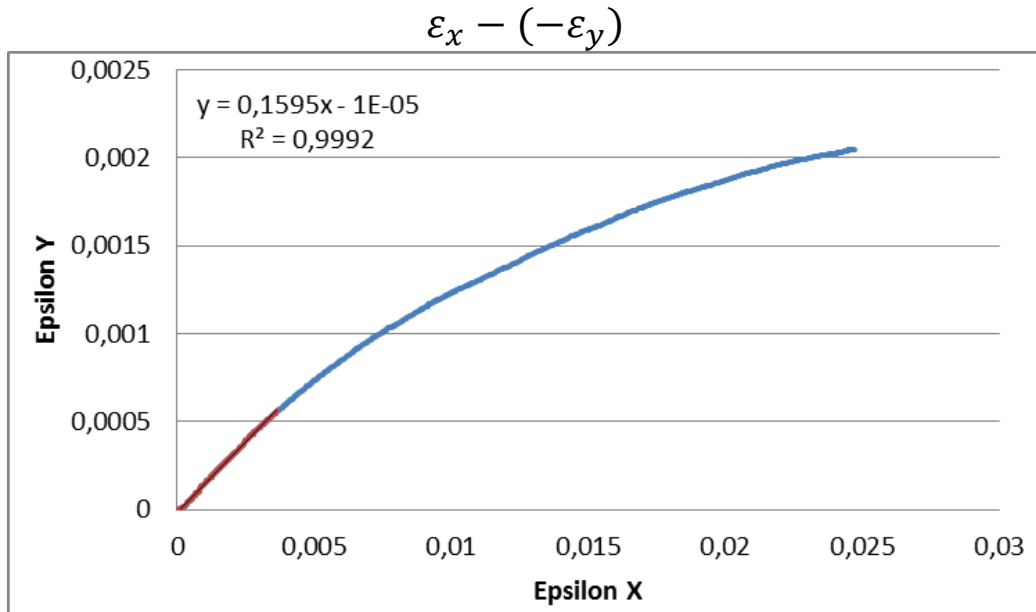


Figura B.21 Curva $\epsilon_x - (-\epsilon_y)$ ensayo de tracción probeta 1 fibra de vidrio.

$$\nu_{xy} = 0,16$$

Probeta 2

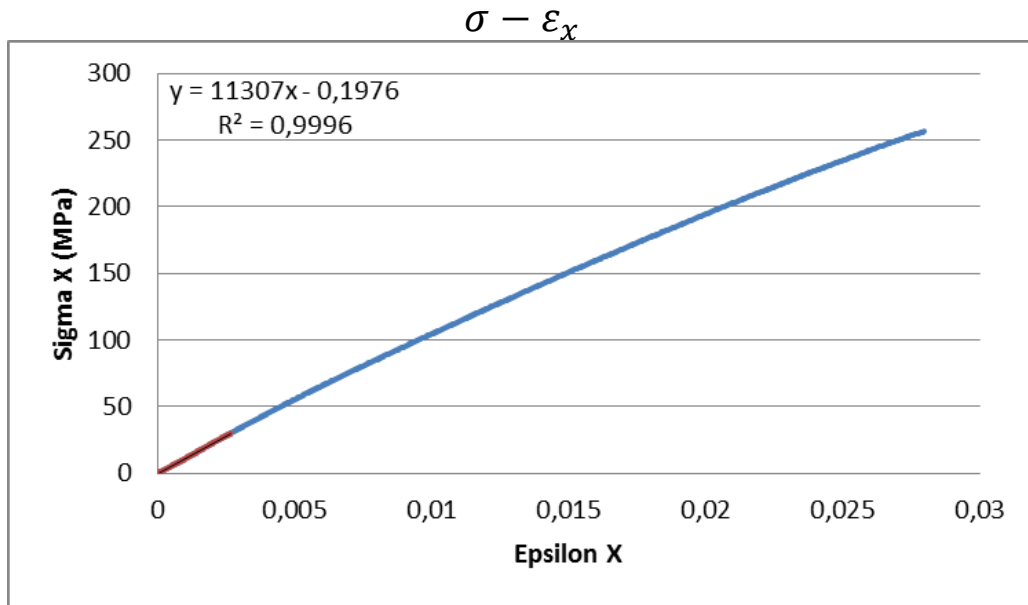


Figura B.22 Curva σ - ϵ ensayo de tracción probeta 2 fibra de vidrio.

$E_x = 11307 \text{ MPa}$

$X = 257 \text{ MPa}$

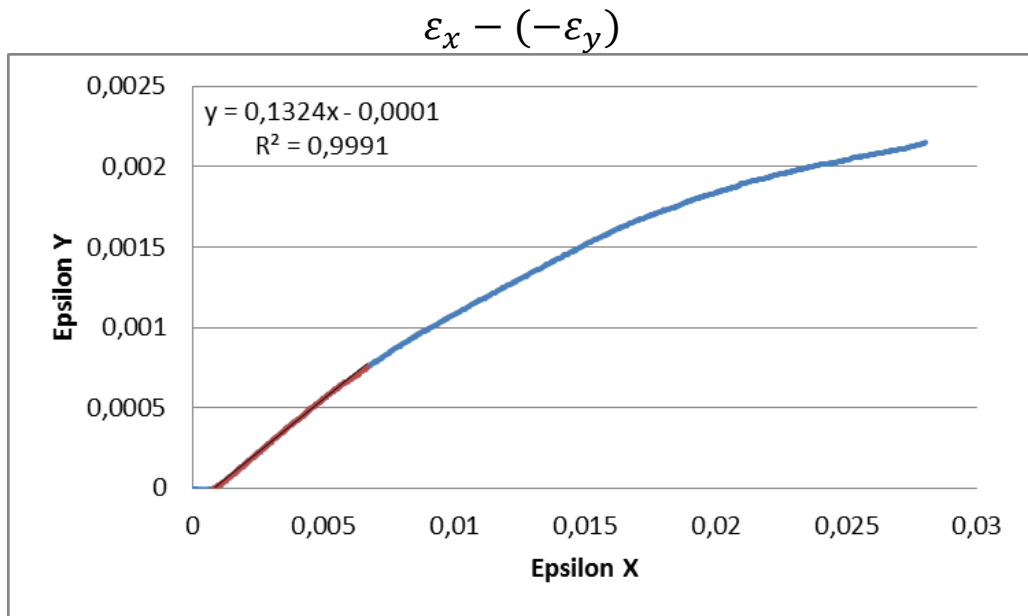


Figura B.23 Curva $\epsilon_x - (-\epsilon_y)$ ensayo de tracción probeta 2 fibra de vidrio.

$\nu_{xy} = 0,13$

Probeta 3

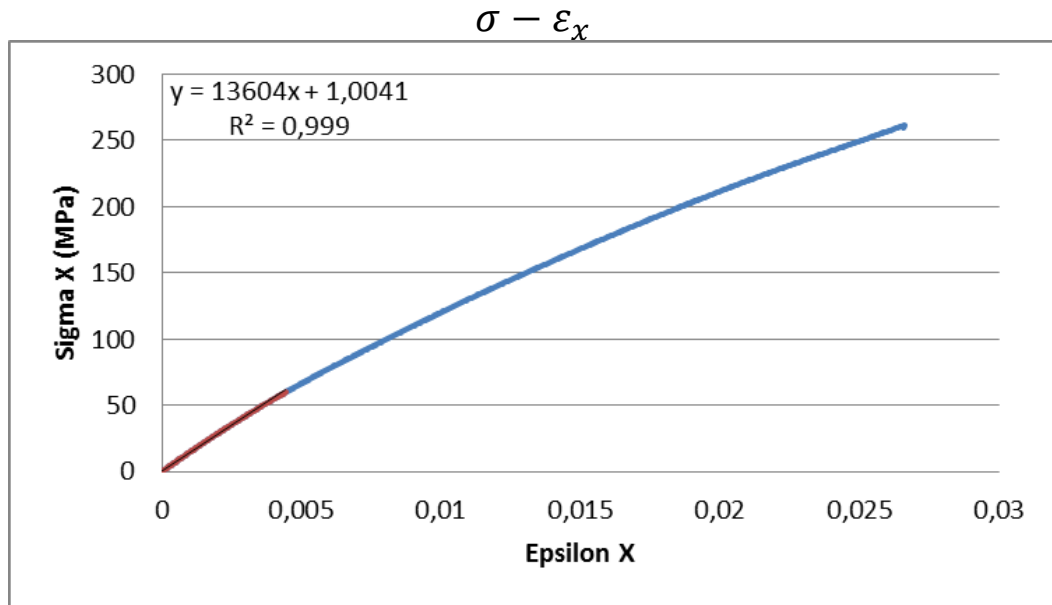


Figura B.24 Curva σ - ϵ ensayo de tracción probeta 3 fibra de vidrio.

$$E_x = 13604 \text{ MPa}$$

$$X = 262 \text{ MPa}$$

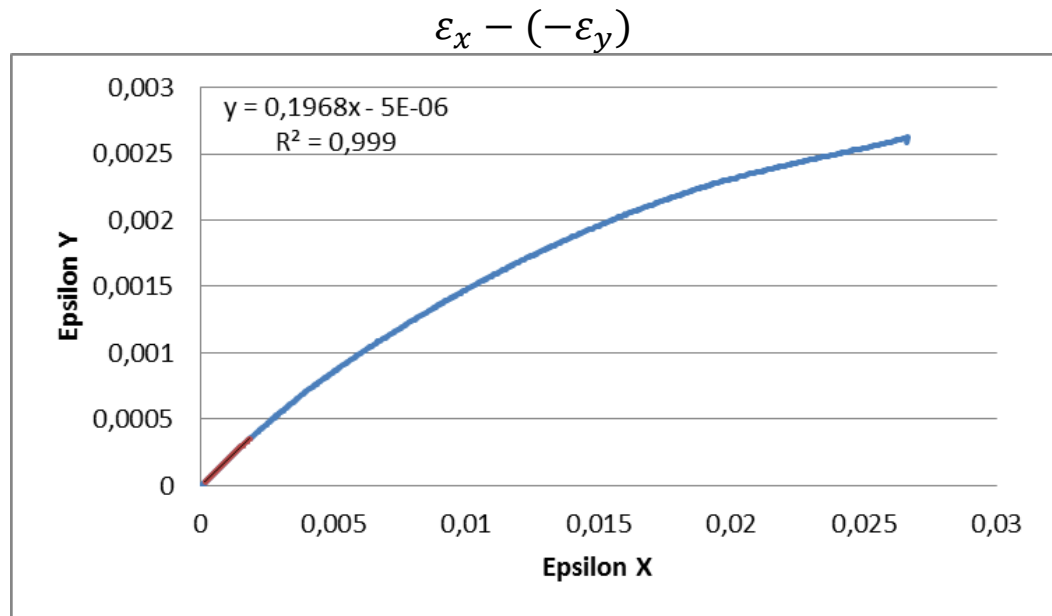


Figura B.25 Curva $\epsilon_x - (-\epsilon_y)$ ensayo de tracción probeta 3 fibra de vidrio.

$$\nu_{xy} = 0,20$$

Probeta 4

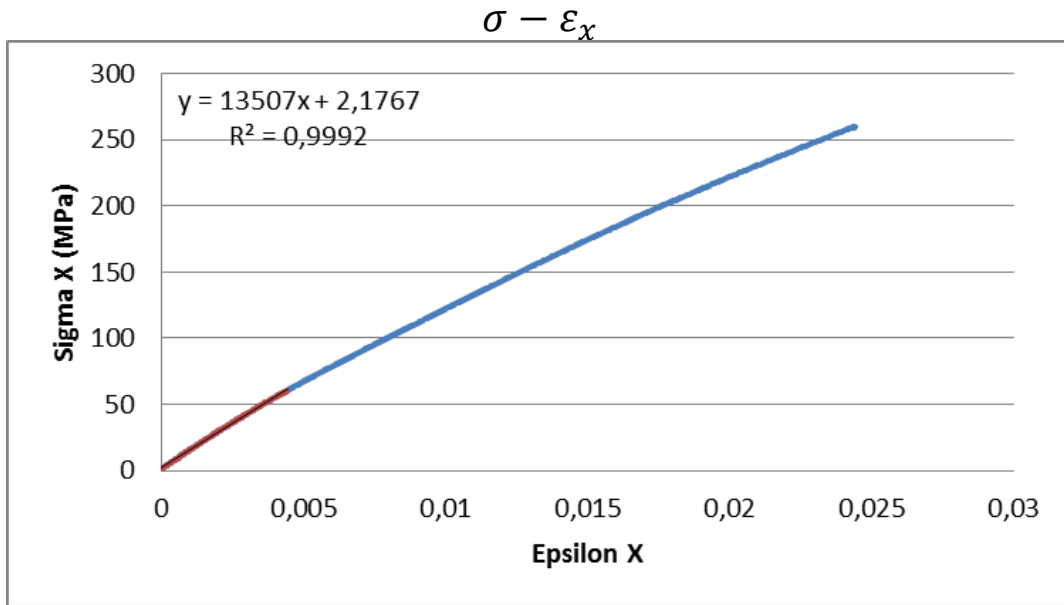


Figura B.26 Curva σ - ϵ ensayo de tracción probeta 4 fibra de vidrio.

$$E_x = 13507 \text{ MPa}$$

$$X = 260 \text{ MPa}$$

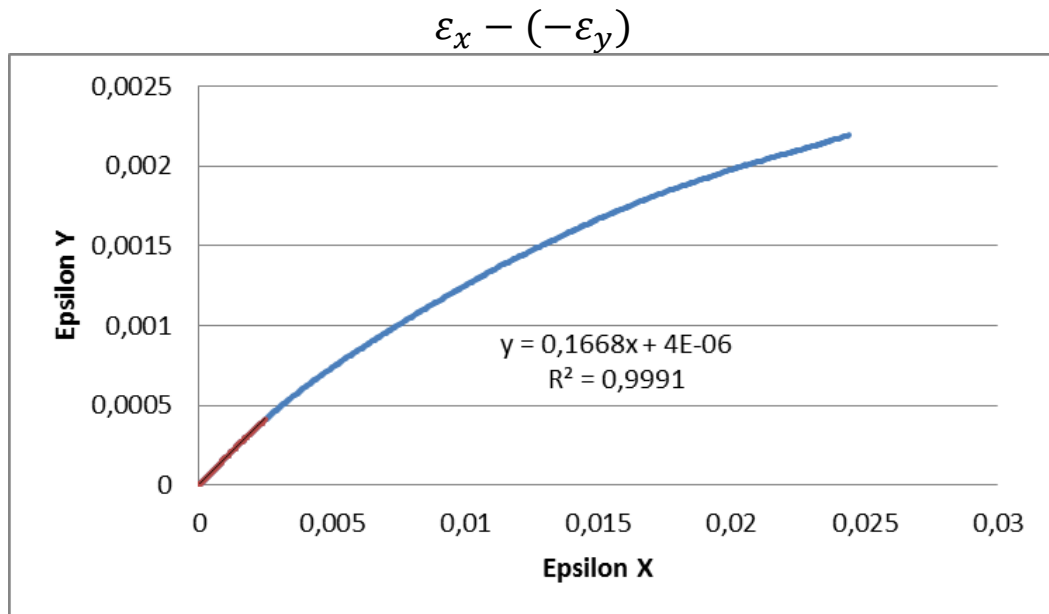


Figura B.27 Curva $\epsilon_x - (-\epsilon_y)$ ensayo de tracción probeta 4 fibra de vidrio.

$$\nu_{xy} = 0,17$$

Probeta 5

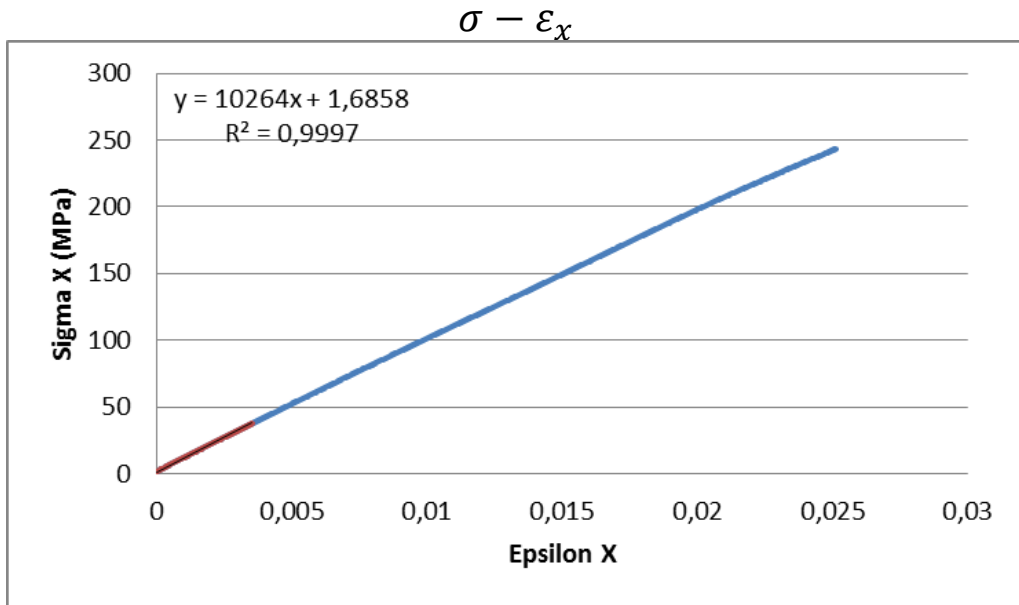


Figura B.28 Curva σ - ϵ ensayo de tracción probeta 5 fibra de vidrio.

$$E_x = 10264 \text{ MPa}$$

$$X = 243 \text{ MPa}$$

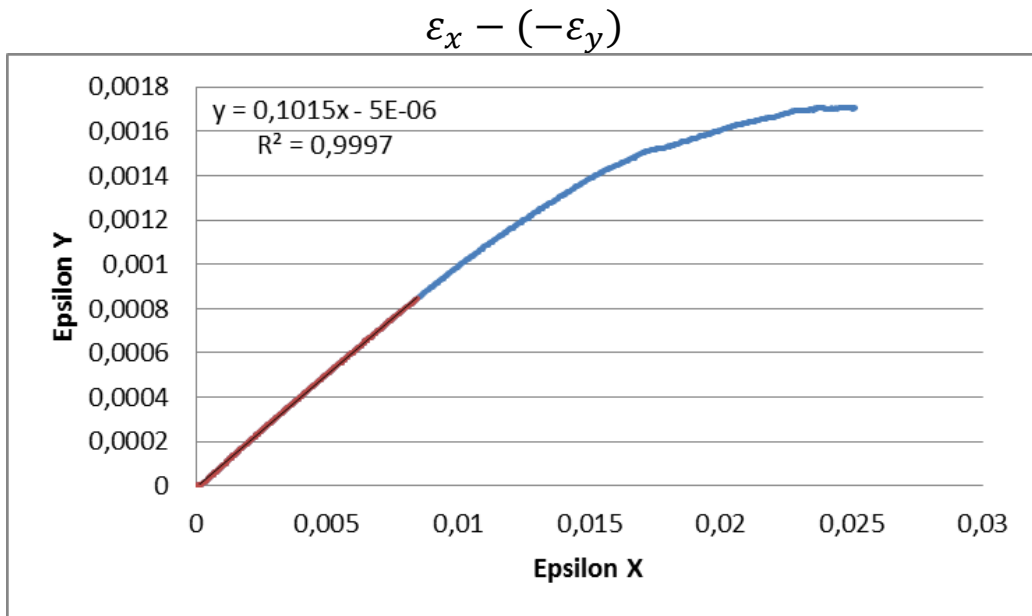


Figura B.29 Curva $\epsilon_x - (-\epsilon_y)$ ensayo de tracción probeta 5 fibra de vidrio.

$$\nu_{xy} = 0,10$$

5 Ensayos de cizalladura

5.1 Ensayos de cizalladura probetas de fibra de carbono

Probeta 1

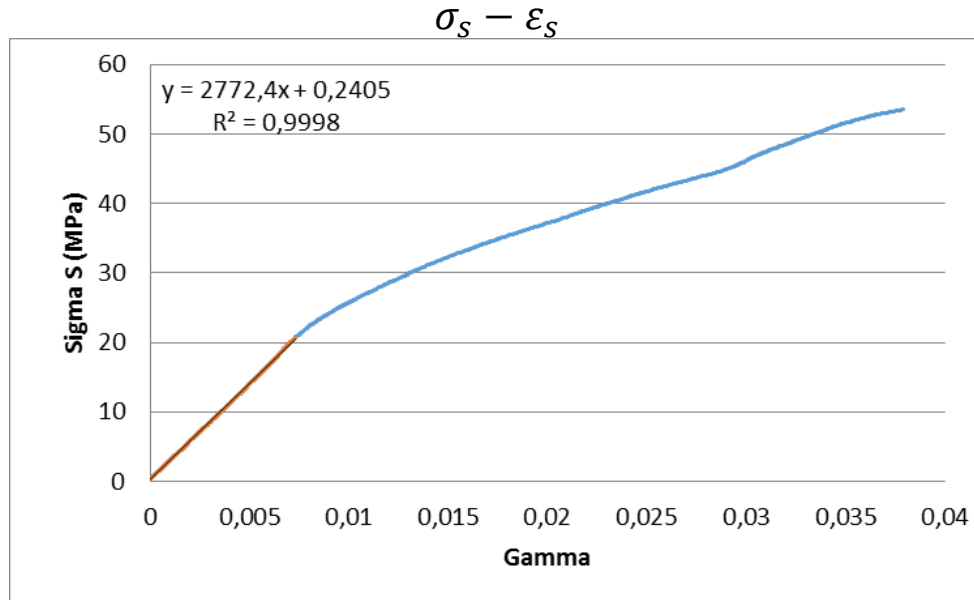


Figura B.30 Curva σ - ε ensayo de cizalladura probeta 1 fibra de carbono.

$$E_s = 2772 \text{ MPa}$$

$$S = 53,56 \text{ MPa}$$

Probeta 2

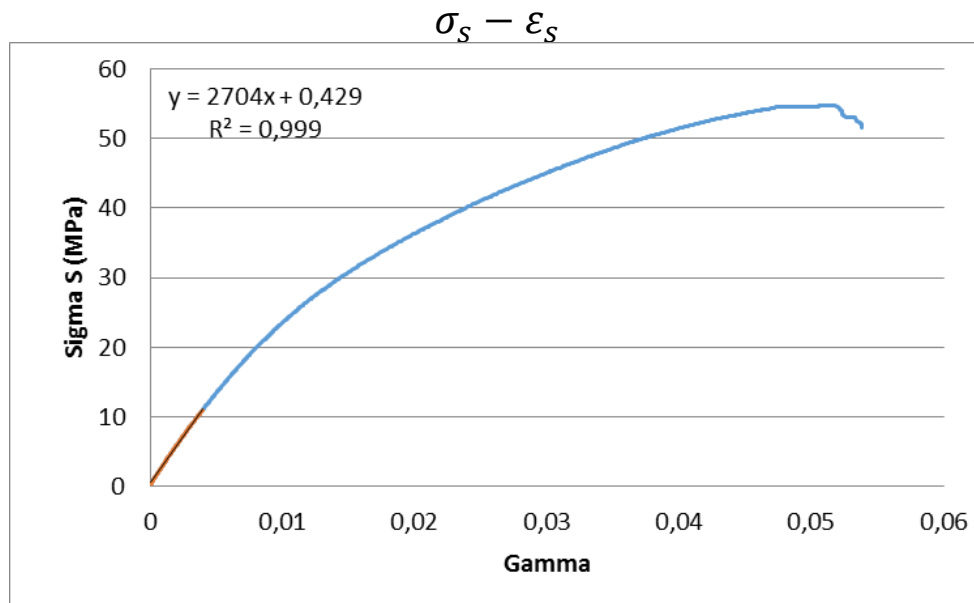


Figura B.31 Curva σ - ε ensayo de cizalladura probeta 2 fibra de carbono.

$$E_s = 2704 \text{ MPa}$$

$$S = 54,76 \text{ MPa}$$

Probeta 3

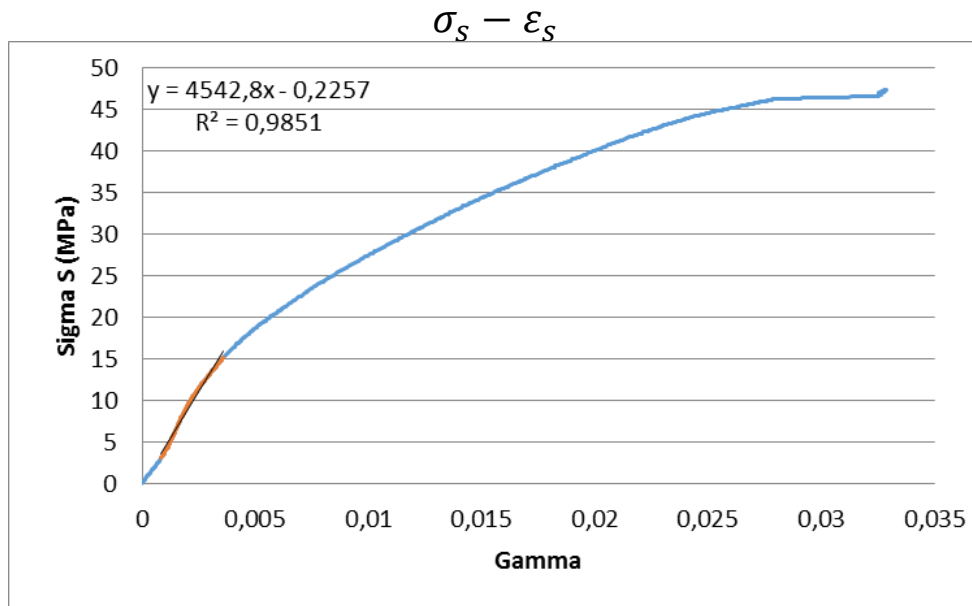


Figura B.32 Curva σ - ϵ ensayo de cizalladura probeta 3 fibra de carbono.

$E_s = 4542 \text{ MPa}$

$S = 47,37 \text{ MPa}$

Probeta 4

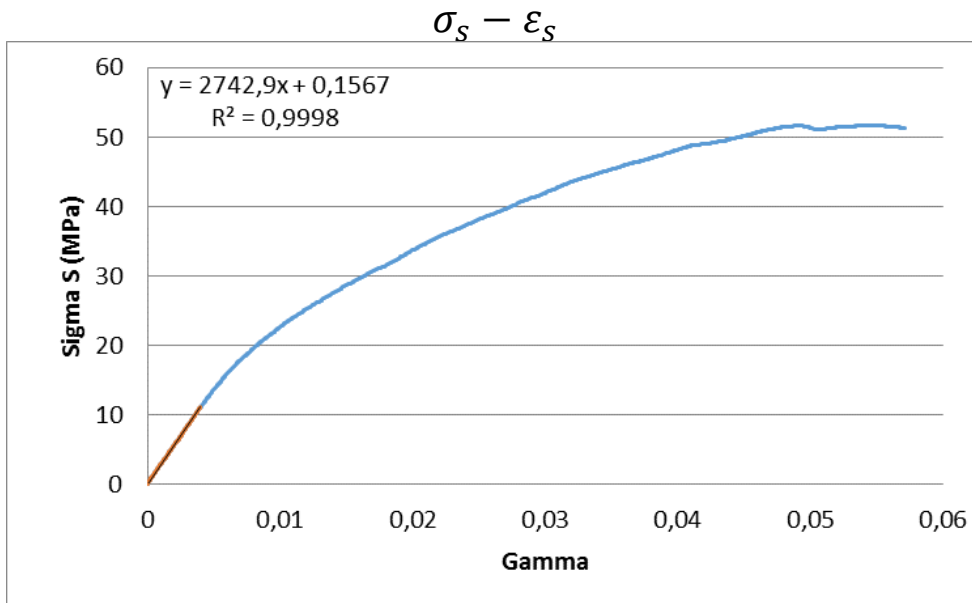


Figura B.33 Curva σ - ϵ ensayo de cizalladura probeta 4 fibra de carbono.

$E_s = 2743 \text{ MPa}$

$S = 51,75 \text{ MPa}$

Probeta 5

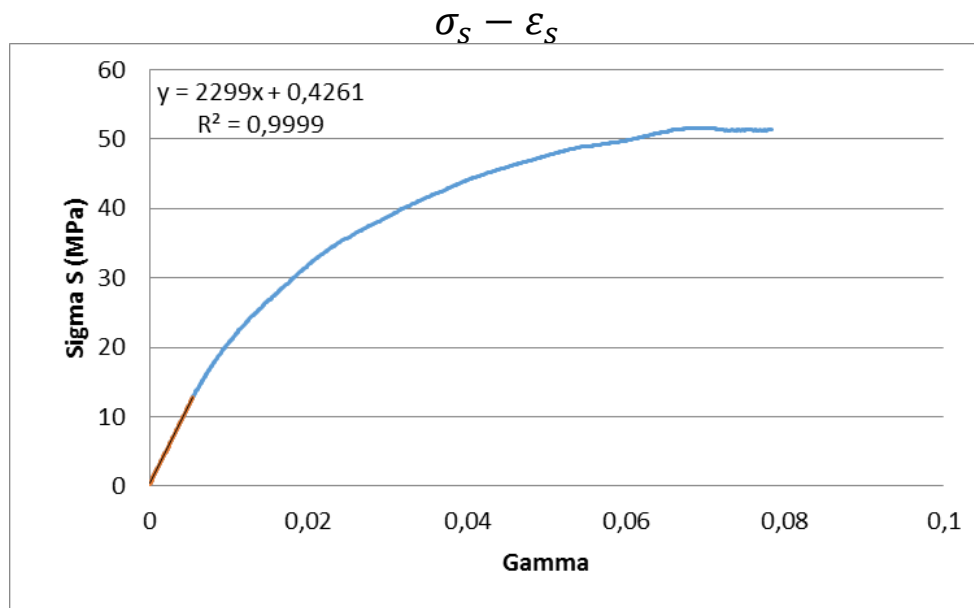


Figura B.34 Curva σ - ε ensayo de cizalladura probeta 5 fibra de carbono.

$$E_s = 2299 \text{ MPa}$$

$$S = 51,62 \text{ MPa}$$

5.2 Ensayos de cizalladura probetas de fibra de vidrio

Probeta 1

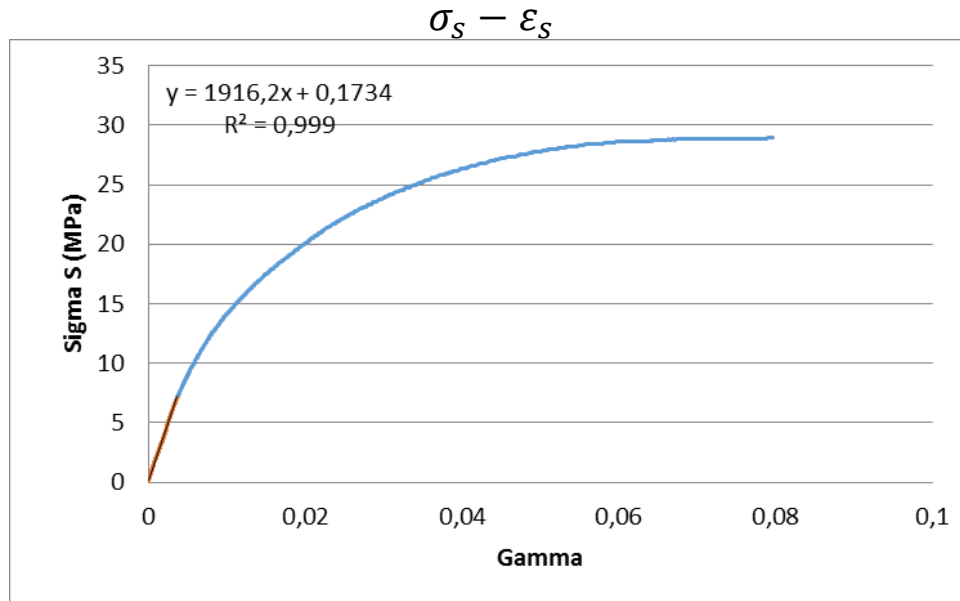


Figura B.35 Curva σ - ε ensayo de cizalladura probeta 1 fibra de vidrio.

$$E_s = 1916 \text{ MPa}$$

$$S = 28,93 \text{ MPa}$$

Probeta 2

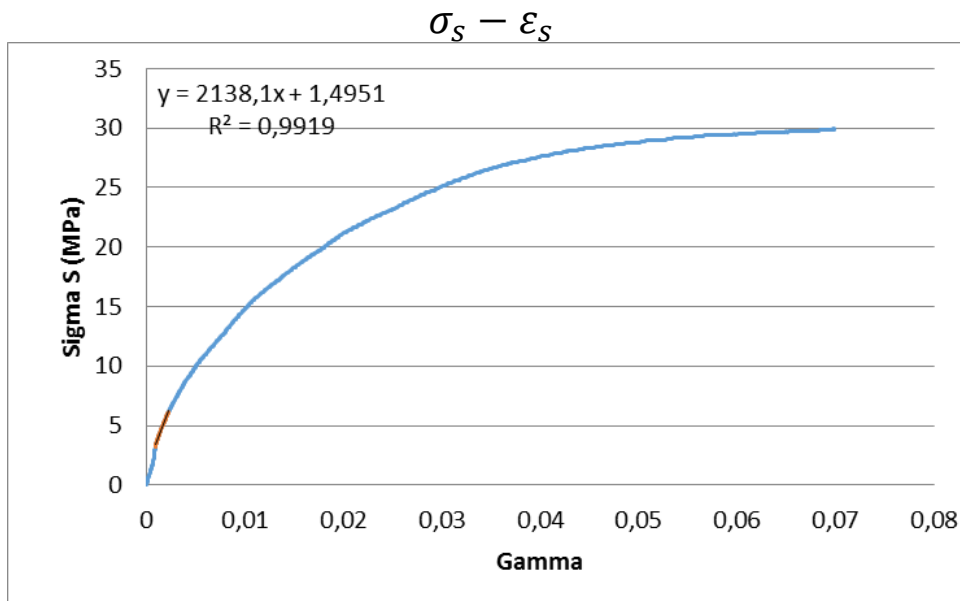


Figura B.36 Curva σ - ε ensayo de cizalladura probeta 2 fibra de vidrio.

$$E_s = 2138 \text{ MPa}$$

$$S = 29,94 \text{ MPa}$$

Probeta 3

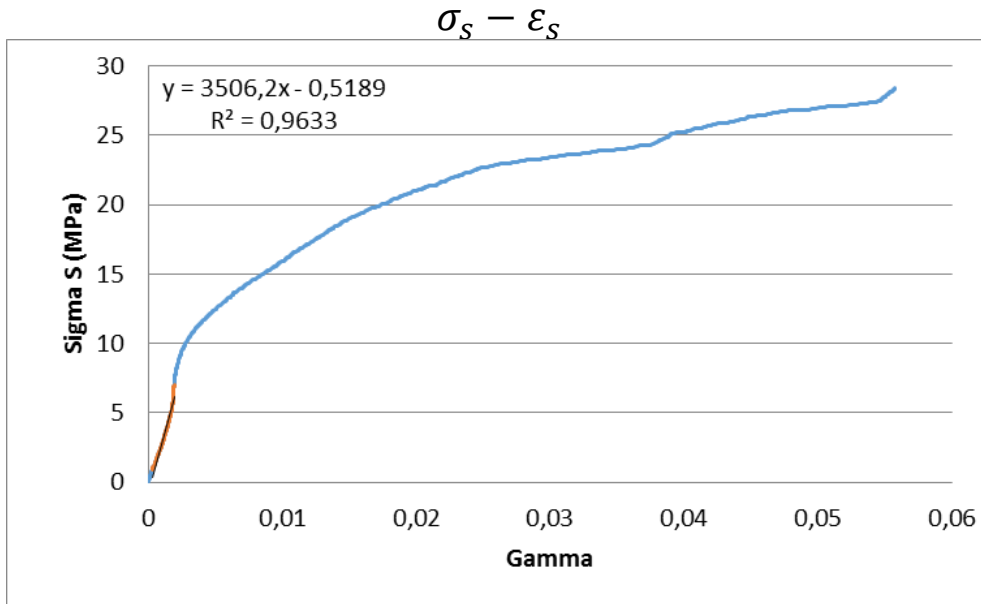


Figura B.37 Curva σ - ε ensayo de cizalladura probeta 3 fibra de vidrio.

$E_s = 3506 \text{ MPa}$

$S = 28,36 \text{ MPa}$

Probeta 4

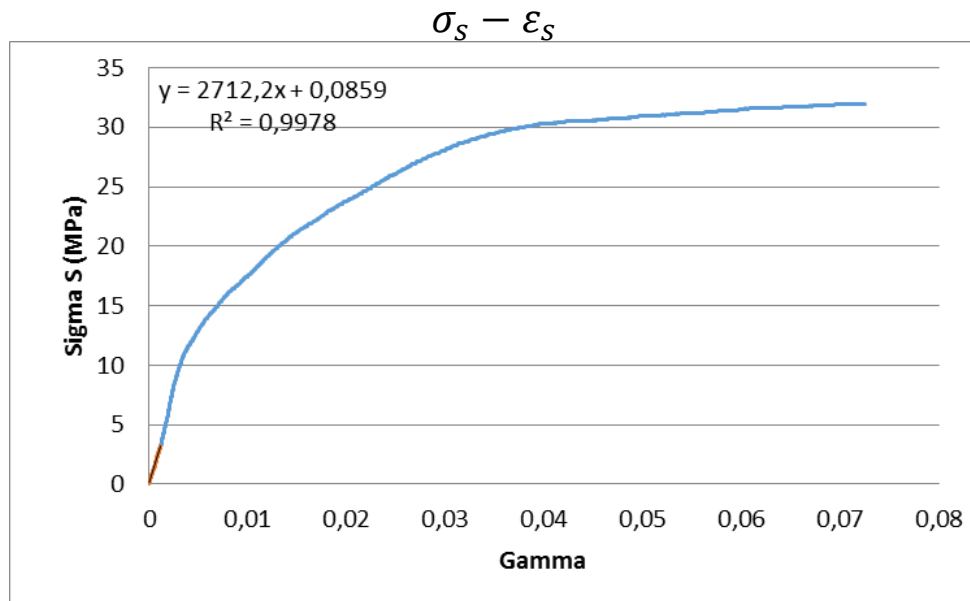


Figura B.38 Curva σ - ε ensayo de cizalladura probeta 4 fibra de vidrio.

$E_s = 2712 \text{ MPa}$

$S = 31,98 \text{ MPa}$

Probeta 5

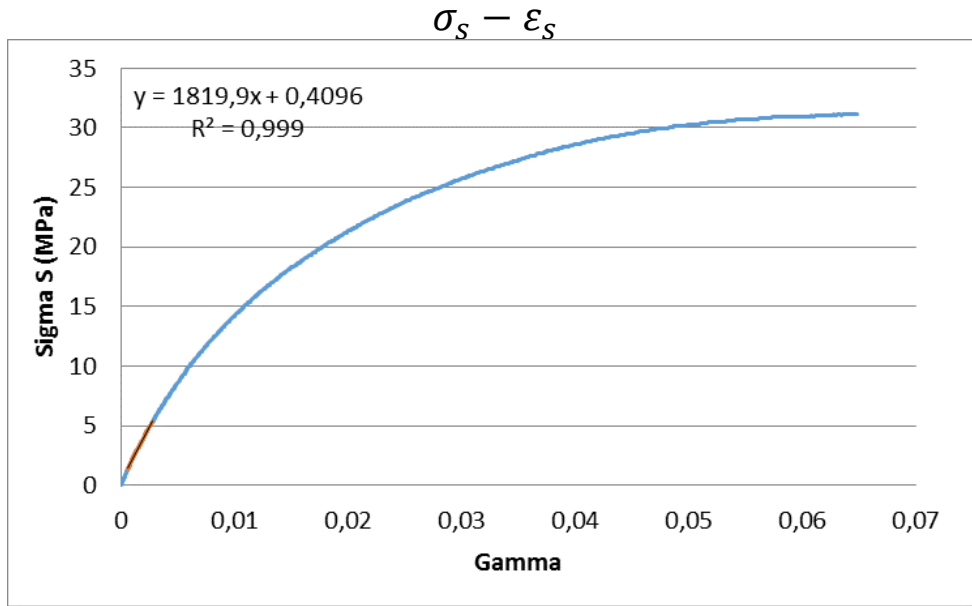


Figura B.39 Curva σ - ε ensayo de cizalladura probeta 4 fibra de vidrio.

$E_s = 1819MPa$

$S = 31,18MPa$

Anexo C Ensayos de caracterización del núcleo.

6 Ensayos de compresión.

6.1 Ensayos de compresión desplazamiento libre.

6.1.1 Velocidad alta 5 mm/s

Probeta 2

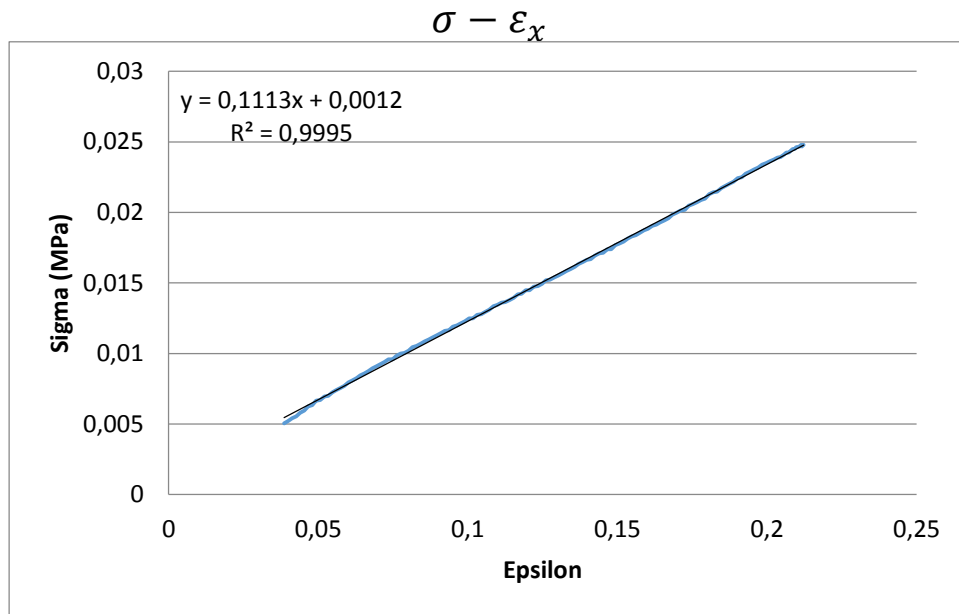


Figura C.40 Curva σ - ϵ ensayo de compresión probeta 2, desplazamiento libre, velocidad 5 mm/s

$$L = 37,36 \text{ mm}$$

$$F_{\text{máx}} = 48,66 \text{ N}$$

$$E_x = 0,1113 \text{ MPa}$$

Probeta 3

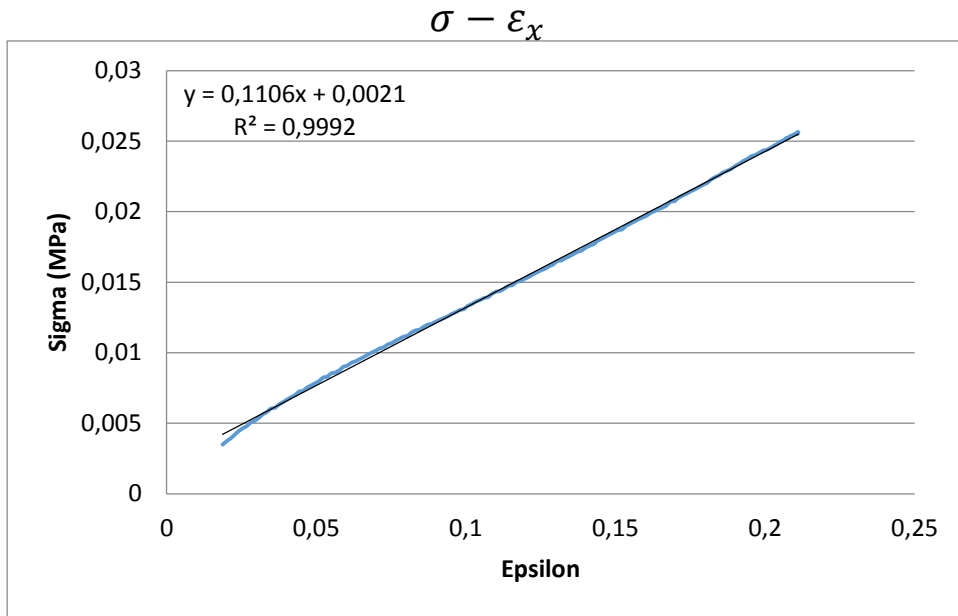


Figura C.41 Curva σ - ϵ ensayo de compresión probeta 3, desplazamiento libre, velocidad 5 mm/s.

$L = 37,64 \text{ mm}$

$F_{\text{máx}} = 50,33 \text{ N}$

$E_x = 0,1106 \text{ MPa}$

Probeta 4

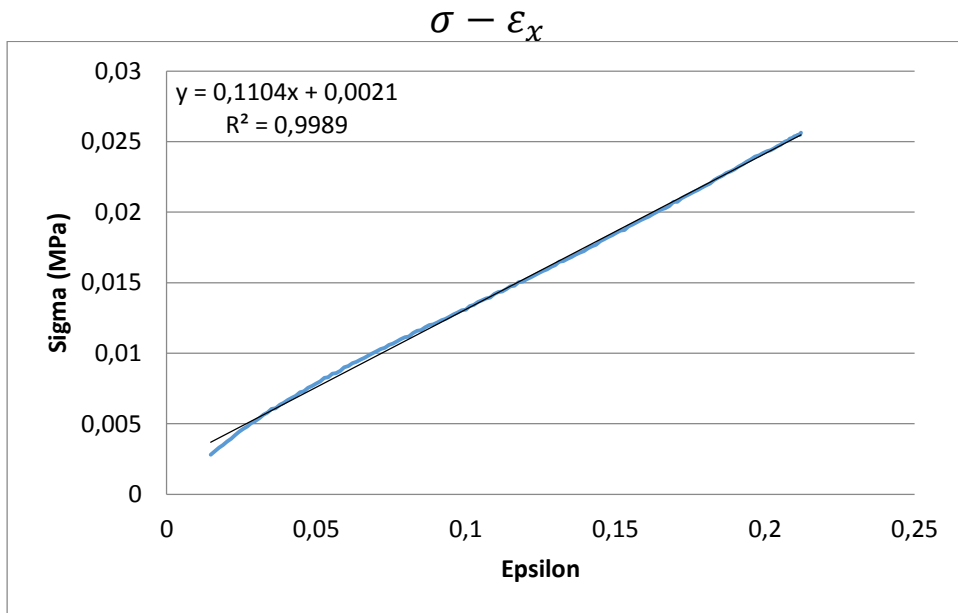


Figura C.42 Curva σ - ϵ ensayo de compresión probeta 4 desplazamiento libre, velocidad 5 mm/s.

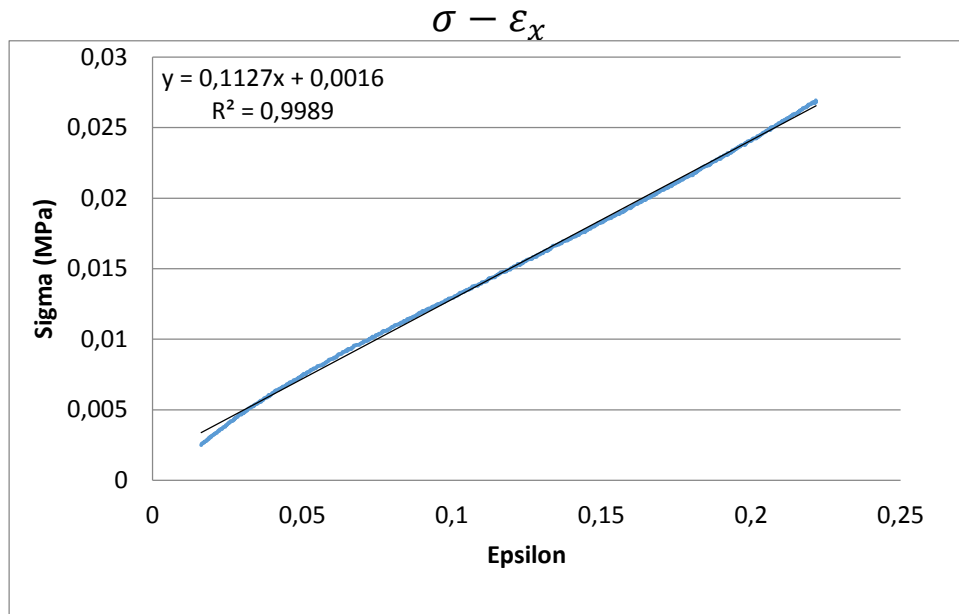
$L = 37,42 \text{ mm}$

$F_{\text{máx}} = 50,33 \text{ N}$

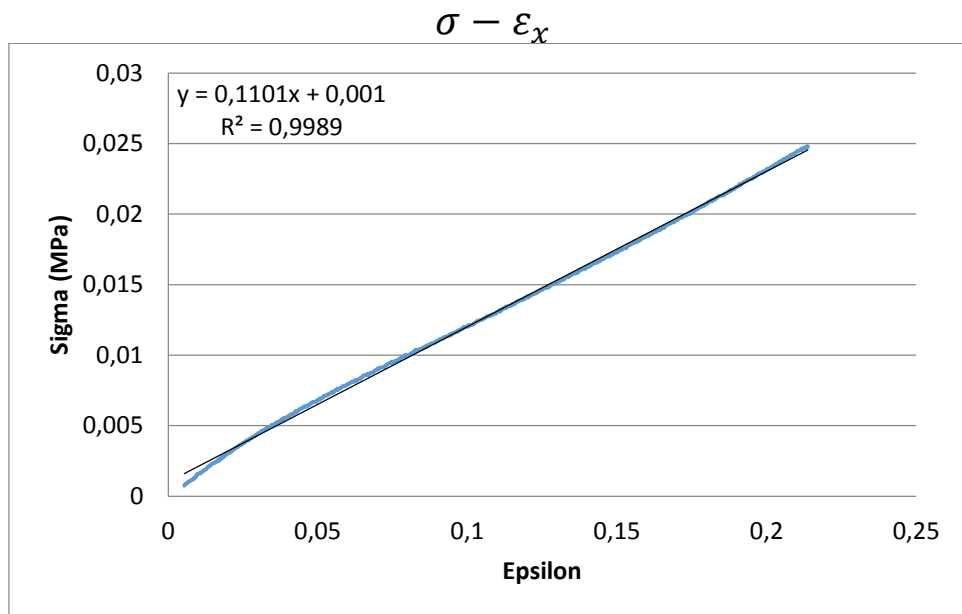
$E_x = 0,1104 \text{ MPa}$

6.1.2 Velocidad baja 0,83 m/s

Probeta 5

Figura C.43 Curva σ - ε ensayo de compresión probeta 5 desplazamiento libre, velocidad 0,83 mm/s. $L = 36,07 \text{ mm}$ $F_{\text{máx}} = 46,70 \text{ N}$ $E_x = 0,1127 \text{ MPa}$

Probeta 6

Figura C.44 Curva σ - ε ensayo de compresión probeta 6 desplazamiento libre, velocidad 0,83 mm/s. $L = 37,42 \text{ mm}$ $F_{\text{máx}} = 41,30 \text{ N}$ $E_x = 0,1101 \text{ MPa}$

Probeta 7

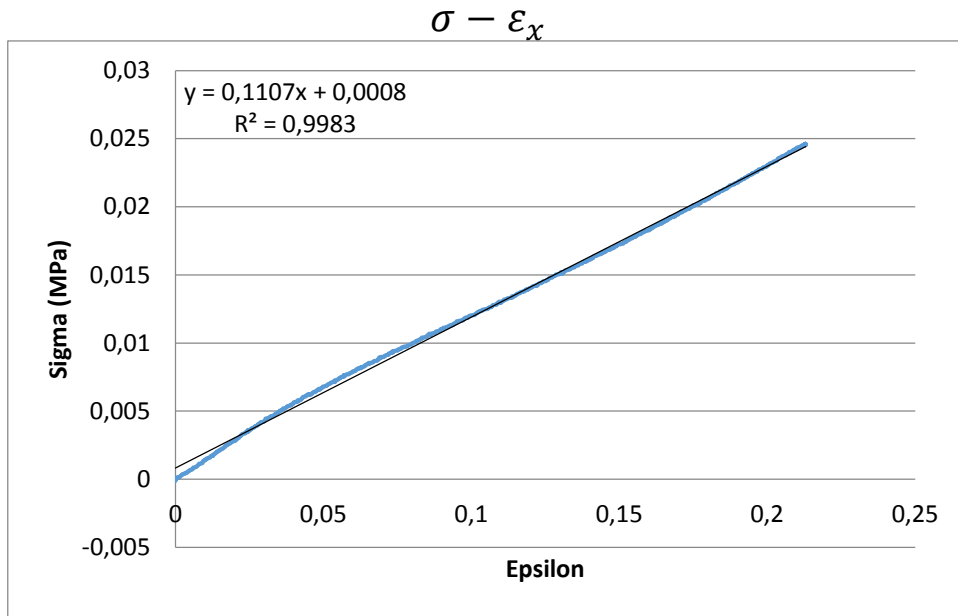


Figura C.45 Curva σ - ϵ ensayo de compresión probeta 7 desplazamiento libre, velocidad 0,83 mm/s.

$L = 37,56\text{mm}$ $F_{\text{máx}} = 42,38\text{ N}$ $E_x = 0,1107\text{ MPa}$

6.2 Ensayos de compresión desplazamiento restringido.

6.2.1 Velocidad alta 5 mm/s

Probeta 8

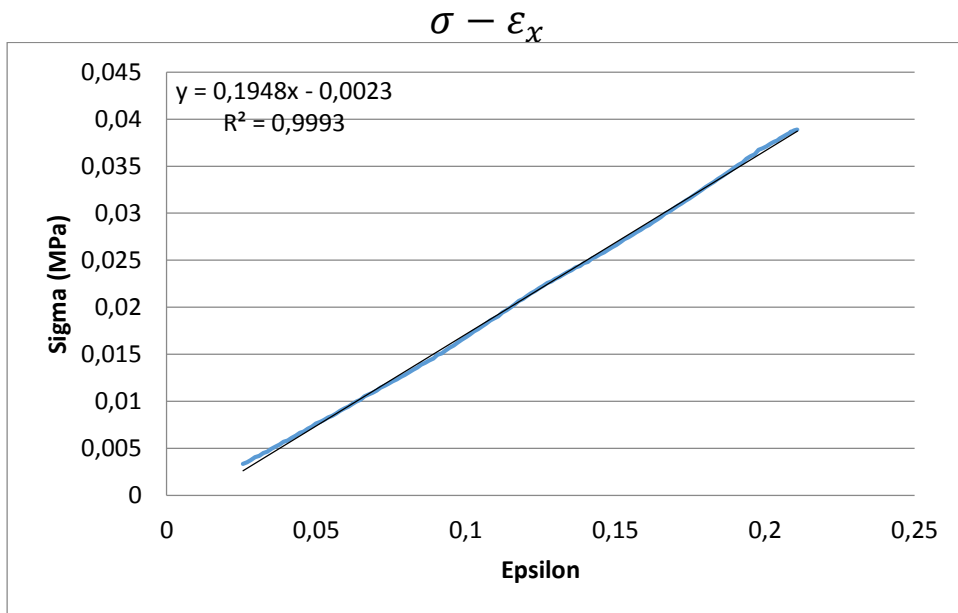


Figura C.46 Curva σ - ϵ ensayo de compresión probeta 8, desplazamiento restringido, velocidad 5 mm/s

$L = 37,49\text{ mm}$ $F_{\text{máx}} = 76,32\text{ N}$ $E_x = 0,1948\text{MPa}$

Probeta 9

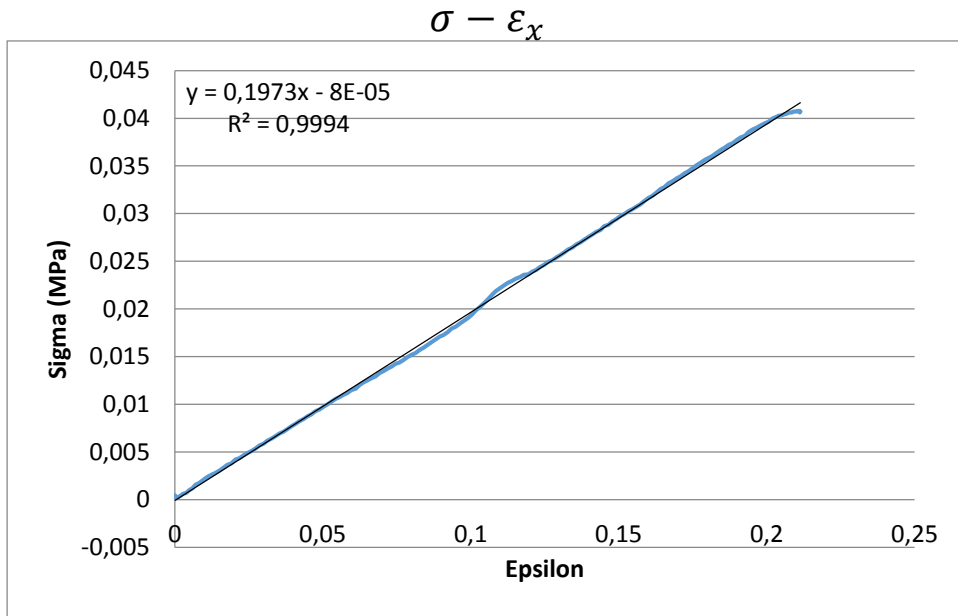


Figura C.47 Curva σ - ϵ ensayo de compresión probeta 9 desplazamiento restringido, velocidad 5 mm/s

$L = 37,55 \text{ mm}$ $F_{\text{máx}} = 80,05 \text{ N}$ $E_x = 0,1973 \text{ MPa}$

Probeta 10

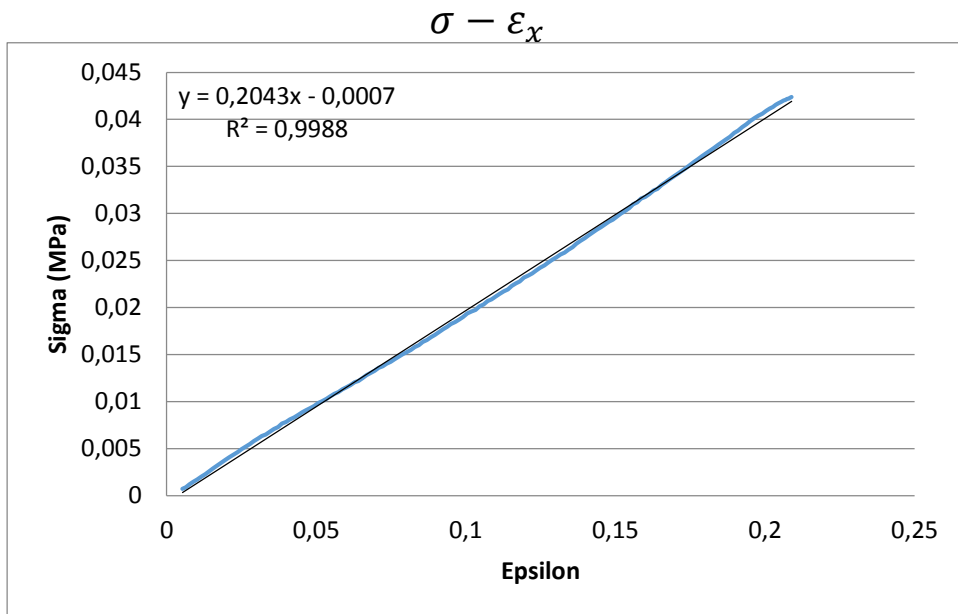


Figura C.48 Curva σ - ϵ ensayo de compresión probeta 10 desplazamiento restringido, velocidad 5 mm/s

$L = 37,70 \text{ mm}$ $F_{\text{máx}} = 81,19 \text{ N}$ $E_x = 0,2043 \text{ MPa}$

6.2.2 Velocidad baja 0,83 mm/s

Probeta 11

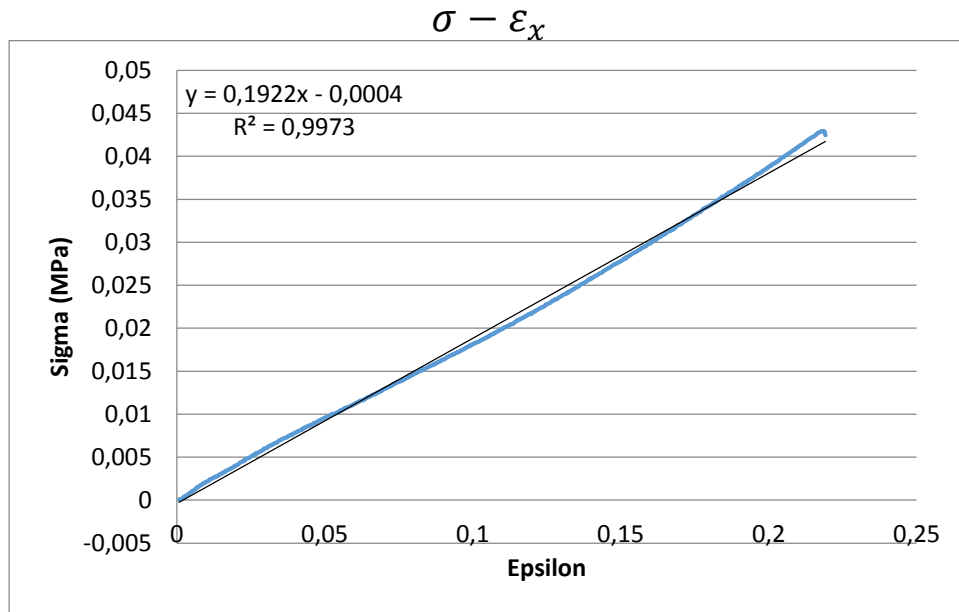


Figura C.49 Curva $\sigma - \epsilon$ ensayo de compresión probeta 11 desplazamiento restringido, velocidad 0,83 mm/s

$L = 36,5 \text{ mm}$

$F_{\text{máx}} = 74,95 \text{ N}$

$E_x = 0,1922 \text{ MPa}$

Probeta 12

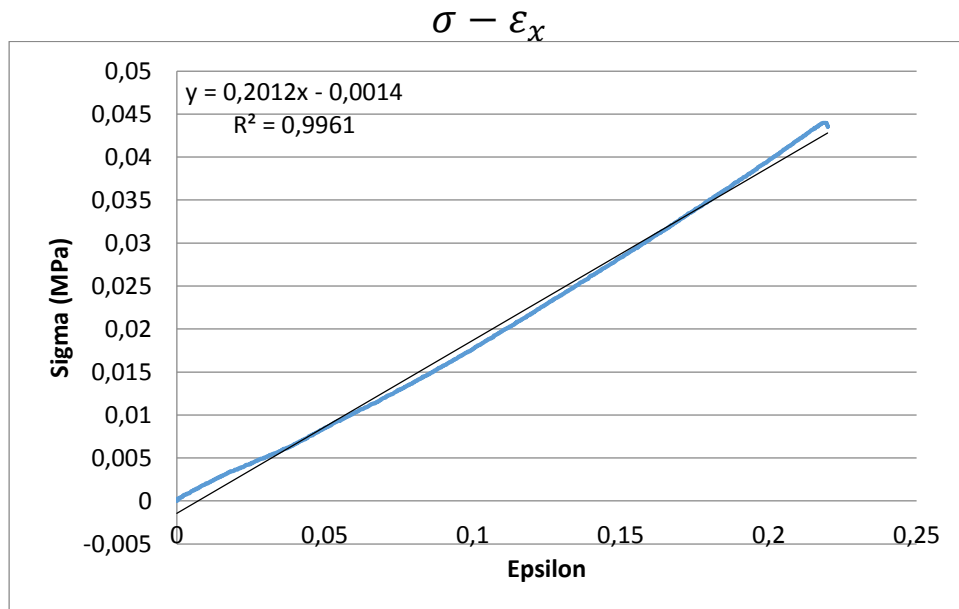


Figura C.50 Curva $\sigma - \epsilon$ ensayo de compresión probeta 12 desplazamiento restringido, velocidad 0,83 mm/s

$L = 36,37 \text{ mm}$

$F_{\text{máx}} = 77,11 \text{ N}$

$E_x = 0,2012 \text{ MPa}$

Probeta 13

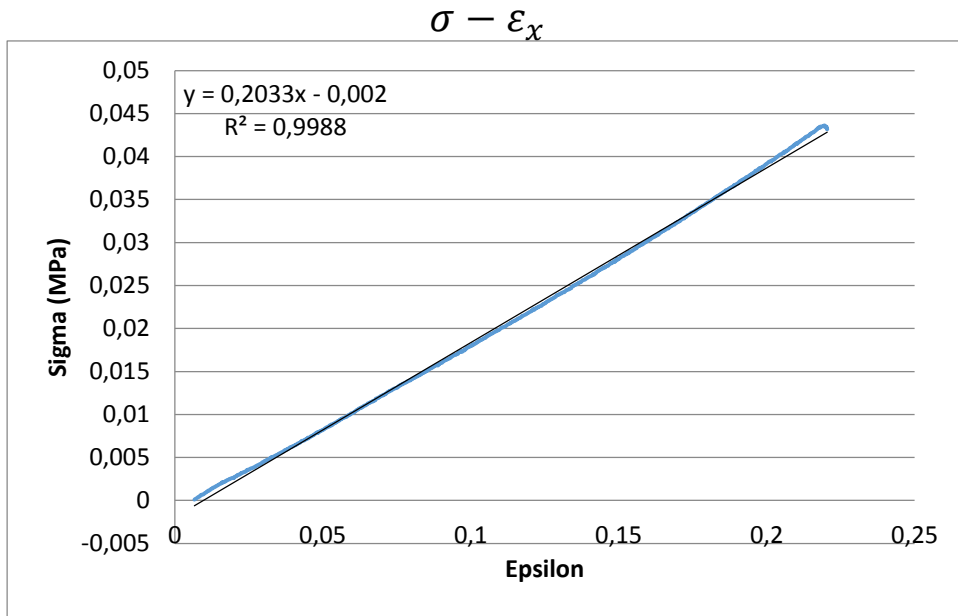


Figura C.51 Curva σ - ϵ ensayo de compresión probeta 13 desplazamiento restringido, velocidad 0,83 mm/s

$L = 36,29 \text{ mm}$ $F_{\text{máx}} = 76,22 \text{ N}$ $E_x = 0,2033 \text{ MPa}$

7 Ensayos de impacto

7.1.1 Velocidad 3 m/s

Probeta 17

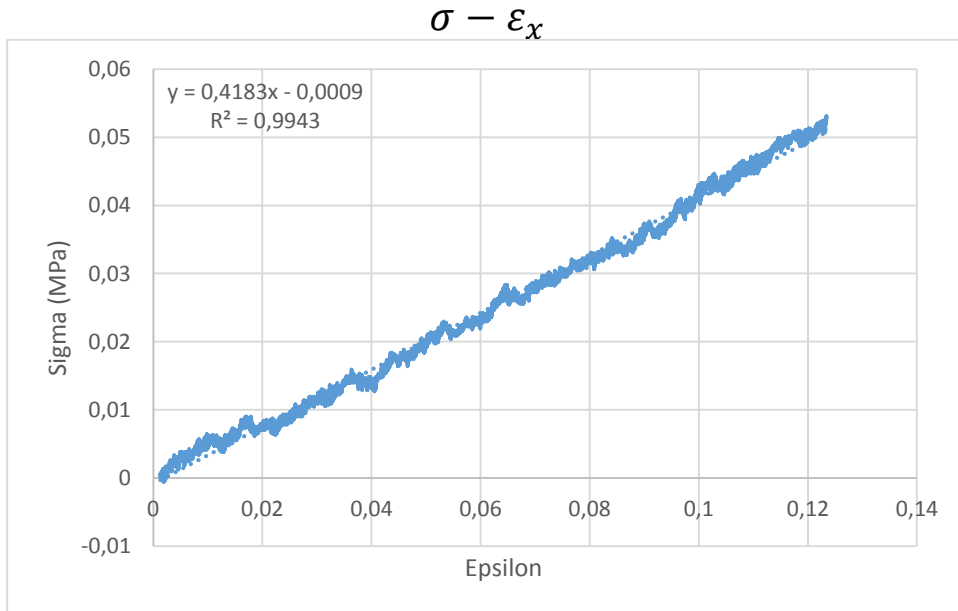
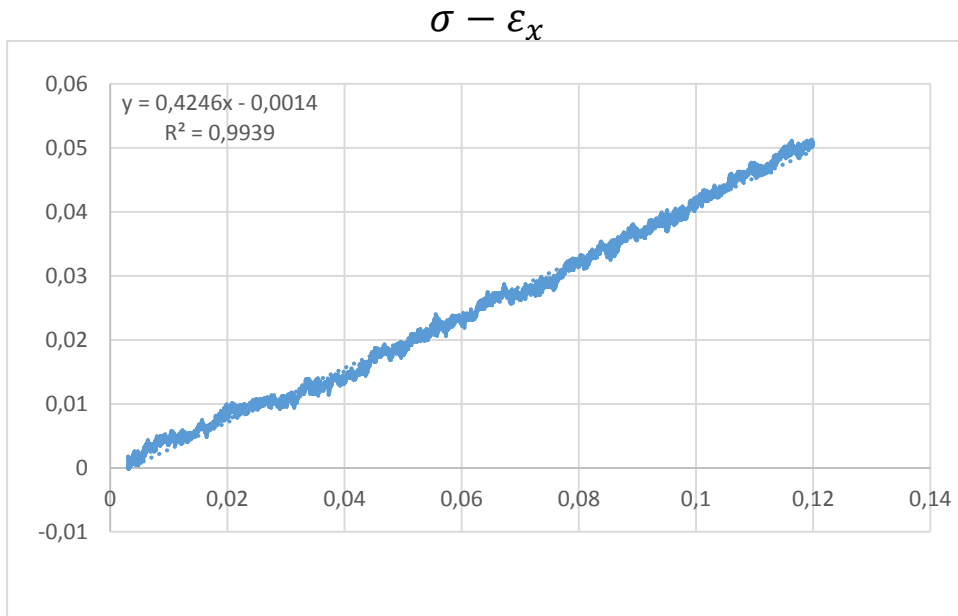


Figura C.52 Curva σ - ϵ ensayo de impacto probeta 17, velocidad 3 m/s

$L = 37,59 \text{ mm}$ $F_{\text{máx}} = 742,55 \text{ N}$ $E_x = 0,4183 \text{ MPa}$

Probeta 18

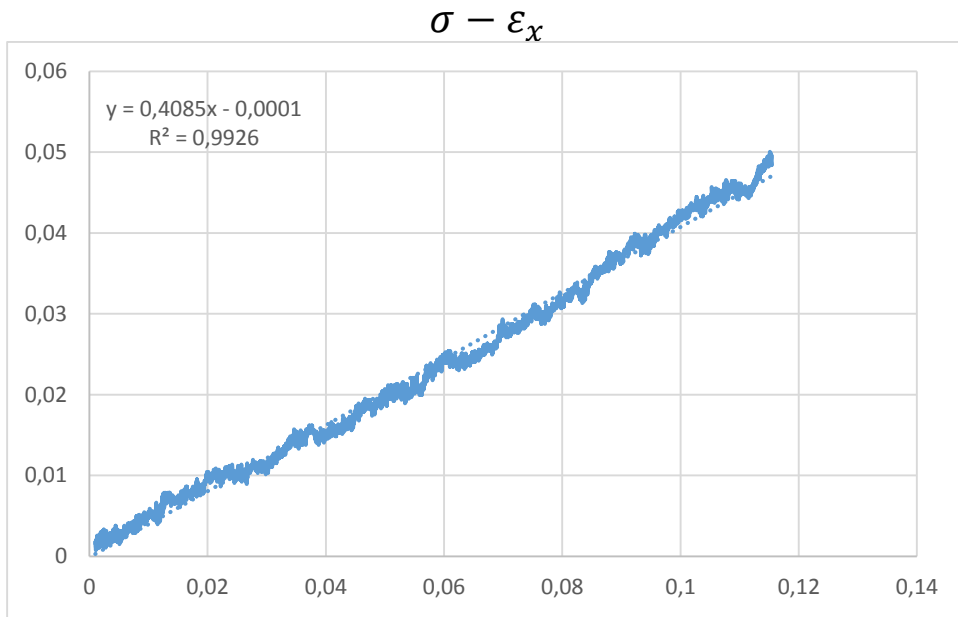


$L = 37,58 \text{ mm}$

$F_{\text{máx}} = 727,03 \text{ N}$

$E_x = 0,4246 \text{ MPa}$

Probeta 19



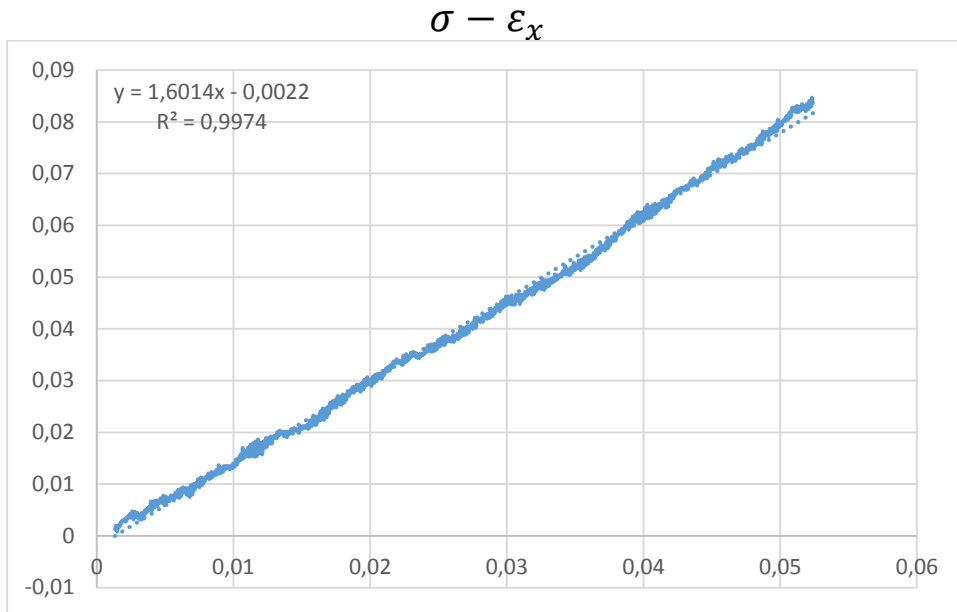
$L = 36,92 \text{ mm}$

$F_{\text{máx}} = 740,80 \text{ N}$

$E_x = 0,4085 \text{ MPa}$

7.1.2 Velocidad 4 m/s

Probeta 20

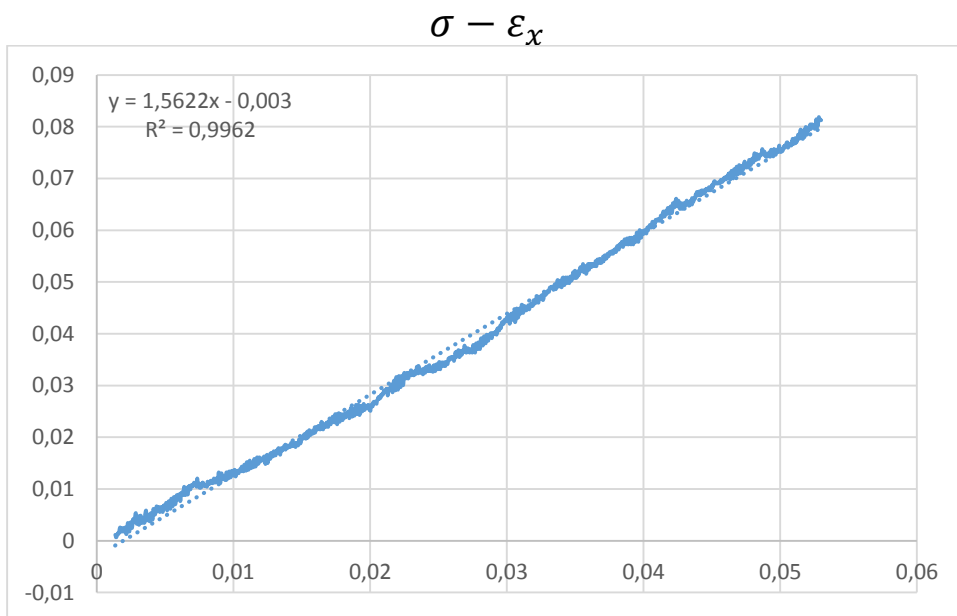


$L = 37,62 \text{ mm}$

$F_{\text{máx}} = 1060,83 \text{ N}$

$E_x = 1,6014 \text{ MPa}$

Probeta 21



$L = 37,1 \text{ mm}$

$F_{\text{máx}} = 1060,83 \text{ N}$

$E_x = 1,5622 \text{ MPa}$

Probeta 22

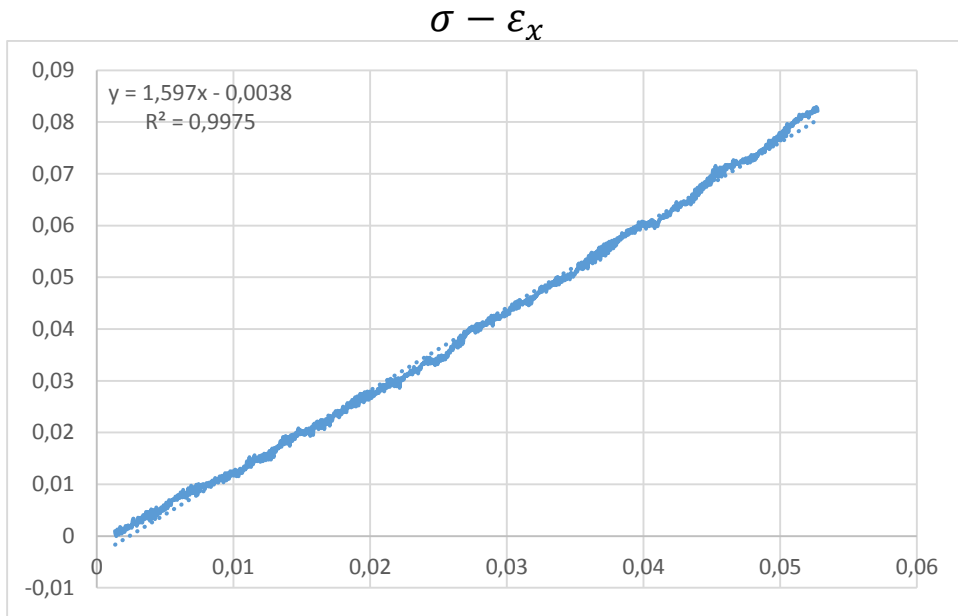


Figura C.57 Curva σ - ε ensayo de impacto probeta 22, velocidad 4 m/s

$L = 37,38 \text{ mm}$

$F_{\text{máx}} = 1082,21 \text{ N}$

$E_x = 1,5970 \text{ MPa}$

7.1.3 Velocidad 4,5

Probeta 14

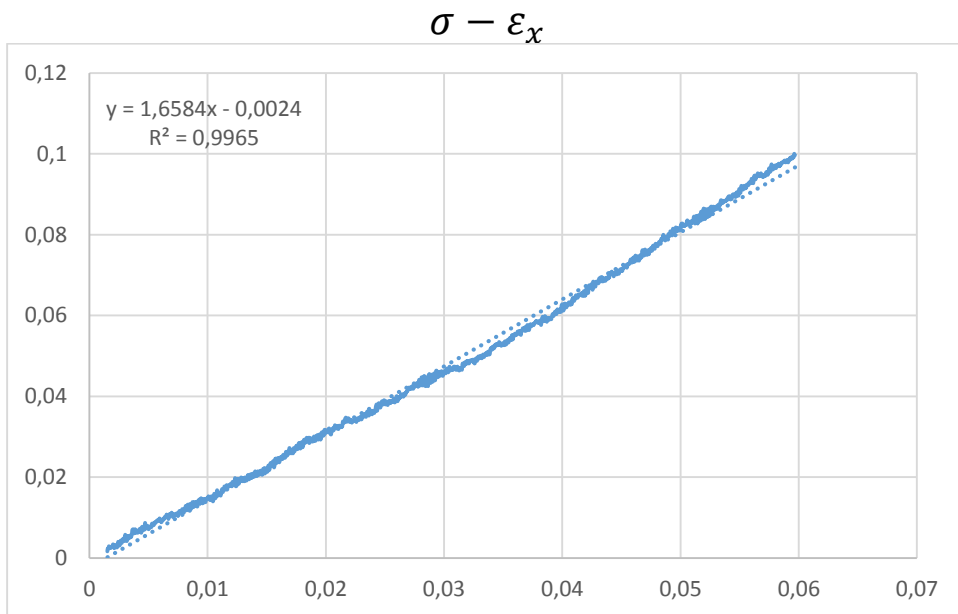


Figura C.58 Curva σ - ε ensayo de impacto probeta 14, velocidad 4,5 m/s

$L = 37,12 \text{ mm}$

$F_{\text{máx}} = 871,39 \text{ N}$

$E_x = 1,6584 \text{ MPa}$

Probeta 15

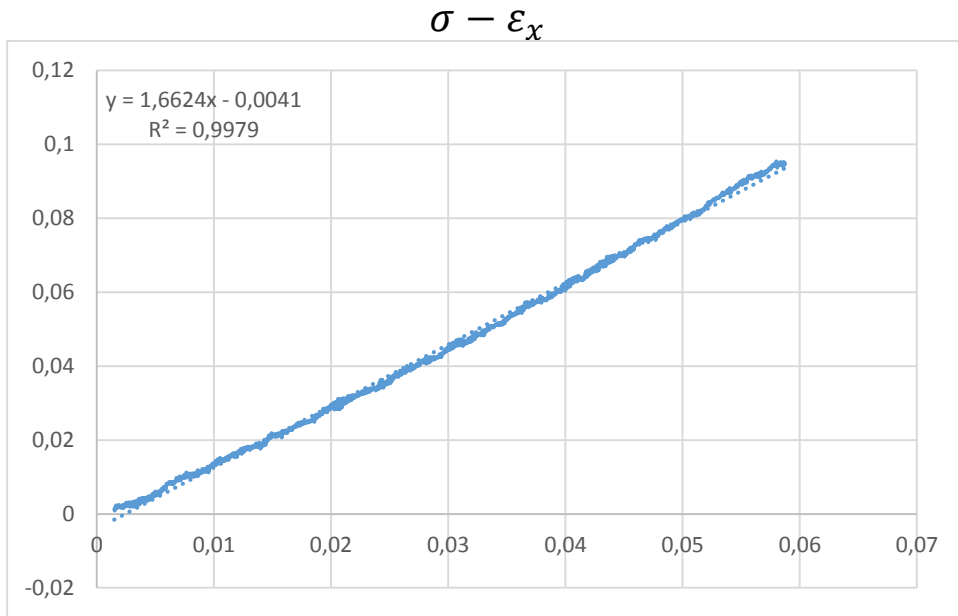


Figura C.59 Curva σ - ϵ ensayo de impacto probeta 15, velocidad 4,5 m/s

$L = 37,73 \text{ mm}$

$F_{\text{máx}} = 1221,87 \text{ N}$

$E_x = 1,6624 \text{ MPa}$

Probeta 16

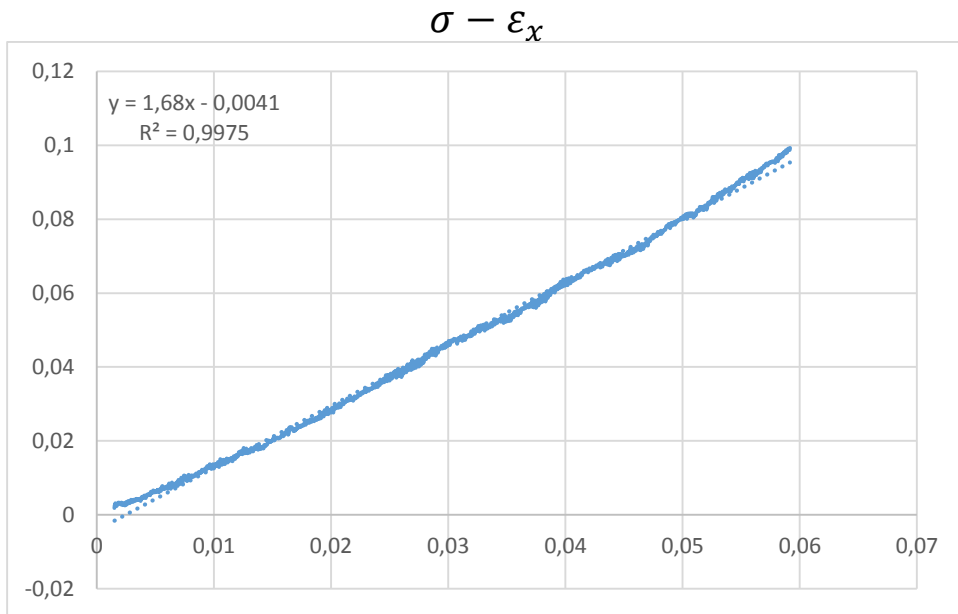


Figura C.60 Curva σ - ϵ ensayo de impacto probeta 16, velocidad 4,5 m/s

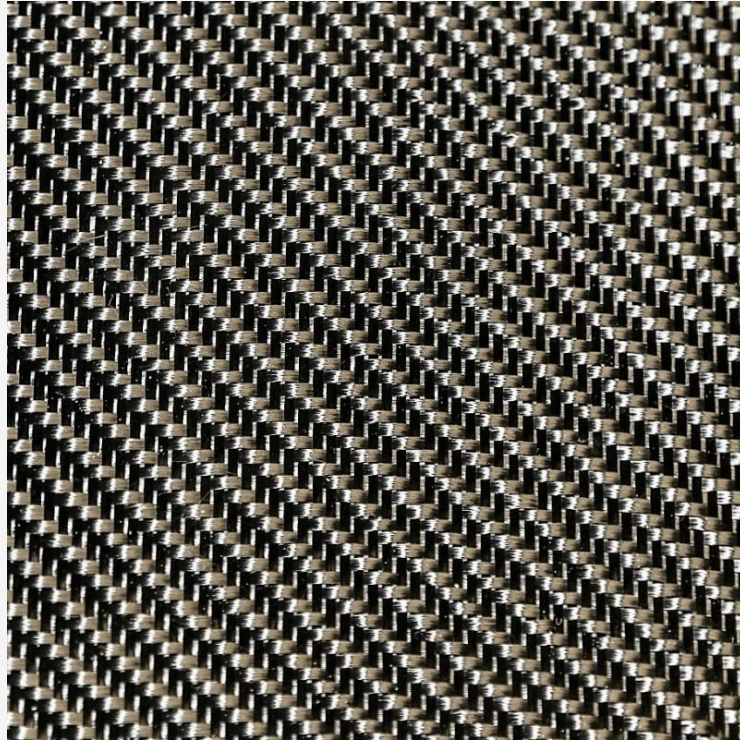
$L = 37,45 \text{ mm}$

$F_{\text{máx}} = 1079,28 \text{ N}$

$E_x = 1,6800 \text{ MPa}$

Anexo D Fichas técnicas

Tejido de carbono sarga 2 x 2 de 3K y 200 g/m2 con ensimaje epoxi



Tejido de carbono de 200 g/m2 para aplicaciones de altas prestaciones dónde se precisa alta resistencia mecánica y poco peso.

Especialmente recomendado para aplicaciones cosméticas ya que este tejido cuenta con un barniz epoxi por una de sus caras, lo que le confiere gran consistencia a la hora de ser cortado. El tejido no se deshace fácilmente y se puede recortar haciendo formas complejas sin que se separen la trama y la urdimbre.

Ideal para combinar con resinas de poliéster, epoxi, viniléster y uretano-acrílicas mediante contacto a mano, infusión o RTM (Inyección).

Tipo de hilo: 3 K (3000 filamentos por hebra de hilo).

Ancho del rollo: 100 cm.

Tipo de suministro

Tejido de carbono sarga 2 x 2 de 3K y 200 g/m2 con ensimaje epoxi x 1 m2, suministrado enrollado y en caja de cartón

Tejido de carbono sarga 2 x 2 de 3K y 200 g/m2 con ensimaje epoxi x 5 m2, suministrado enrollado y en caja de cartón

Tejido de carbono sarga 2 x 2 de 3K y 200 g/m2 con ensimaje epoxi x 25 m2, suministrado enrollado y en caja de cartón

Tejido de carbono sarga 2 x 2 de 3K y 200 g/m2 con ensimaje epoxi x 50 m2, suministrado enrollado y en caja de cartón

RESOLTECH 1020

Hardeners 1023S to 1029S

Multipurpose Epoxy Laminating System

- Adjustable pot life from 11mn to 9h20min
- Good elongation to break characteristics
- Little sensitivity to humidity during application
- Available in thixotropic version (1020T)



The new version (2015) of RESOLTECH 1020 is a room temperature epoxy laminating system for wood-epoxy, concrete reinforcement and metal constructions that are inherently moving structures.

In boat building ,it may be used for: all woods types lamination, coating, scarfing, strip planking, as well as bonding in form of fillet joints applications when filled with wood flour and silica.

Thanks to its **low viscosity** and a wide range of **hardeners (11 min to 9h20min)**, it allows applications in both traditional wet layup, vacuum bagging or under press. A thixotropic version , the **1020T** is available for vertical or overhanging applications prone to dripping.

The mixing ratio for all hardeners of this system is 100:30 by weight. All hardeners are compatible and can be mixed to obtain intermediate reactivities.

The 1020 exceptional wettability makes hand lamination easier to the workers while guaranteeing a safer work place due to the low toxicity of this system, it contains no CMR components and complies to the latest 2015 REACH European regulation.

The 1020 resin system is also widely used in civil engineering applications on glass and carbon laminates where its little sensitivity to humidity during its application and good curing properties at ambient temperature are appreciated.

The 1020 system is often used together with:

- **RESOLCOAT 1010:** Water based epoxy primer for porous supports
- **RESOLTECH 2040G:** Fillet joint adhesive paste
- **RESOLTECH 8020:** Epoxy filler

Resin 1020

Hardeners 1023S, 1024S, 1025S, 1026S, 1028S, 1029S

MIXING RATIO

System	1020 / 1023S	1020 / 1024S	1020 / 1025S	1020 / 1026S	1020 / 1028S	1020 / 1029S
Mixing ratio by weight	100 / 30					
Mixing ratio by volume	100 / 35	100 / 34	100 / 34	100 / 34	100 / 33	100 / 33

The mixing ratio must be respected neither excess nor default. The mixture should be homogeneous and intimate with the use.

APPLICATION

It is recommended to use products at a temperature close to 18-25°C in order to facilitate the mixing and the reinforcements impregnation.

Lower temperatures will increase the viscosity of the mixture and the gel time, but the resin will not crystallize at low temperatures.

On the contrary, a higher temperature will reduce the viscosity of the mixture as well as the pot life.

PHYSICAL CHARACTERISTICS

Visual aspect

1020 :	Opalescent neutral liquid
1023S to 1029S :	Neutral to transparent yellow liquid
Mixture aspect :	Neutral to transparent yellow liquid

Densities (ISO 1675, ±0.05)

References	1020	1023S	1024S	1025S	1026S	1028S	1029S
Density at 23°C	1.10	0.94	0.95	0.96	0.97	0,98	1.00
Mix density at 23°C	-	1.06	1.07	1.07	1.07	1.07	1.08

Viscosities (ISO 12058.2, ±15%)

References	1020	1023S	1024S	1025S	1026S	1028S	1029S
Viscosity at 23°C (mPa.s)	1250	13	22	31	43	72	165
Mix viscosity at 23 (mPa.s)	-	340	460	550	610	760	940

Resin 1020

Hardeners 1023S, 1024S, 1025S, 1026S, 1028S, 1029S

REACTIVITIES

Systems	Gel time on 70mL @ 23°C (4cm high)	Time at exothermic peak on 70mL @ 23°C	Temperature at exothermic peak on 70mL @ 23°C	Gel time on 2mm film @ 23°C
1020 / 1023S	9 h 20 min	NR	30°C	13 h 40 min
1020 / 1024S	3 h 10 min	NR	40°C	7 h 25 min
1020 / 1025S	1 h 15 min	1 h 32 min	123°C	4 h 45 min
1020 / 1026S	40 min	42 min	180°C	3 h 45 min
1020 / 1028S	22 min	24 min	166°C	2 h 15 min
1020 / 1029S	11 min	12 min	187°C	1 h

Reactivity measurements realized with Trombotech®
NR : Not Representative

RETICULATION & POST-CURING

90% of the thermo-mechanical properties are obtained after 7 days at room temperature (25°C). To obtain a material at its highest thermo-mechanical properties with a T_G of up to 60°C, it is necessary to post-cure the laminate.

Curing Cycles	14 days at 23°C		16h at 60°C	
	T _G	Shore D Hardness	T _G	Shore D Hardness
1020 / 1023S	43.2°C	85	51.0°C	86
1020 / 1024S	45.2°C	86	50.0°C	86
1020 / 1025S	46.1°C	86	52.2°C	86
1020 / 1026S	46.1°C	86	54.0°C	86
1020 / 1028S	47.9°C	86	55.2°C	86
1020 / 1029S	48.5°C	87	60.3°C	87

T_G measured with Kinetech® (DMA type)
Hardness : ISO 868

The following data is an indication of the curing time at room temperature (23 °C) in order to release from moulds and obtain a hard and sandable laminate:

1020+1023S : 40h 1020+1025S : 20h 1020+1028S : 8h
1020+1024S : 30h 1020+1026S : 16h 1020+1029S : 3h

Page 3/4

Resin 1020

Hardeners 1023S, 1024S, 1025S, 1026S, 1028S, 1029S

MECHANICAL PROPERTIES

Flexural properties on non reinforced resin according to ISO 178

Systems	Flexion					
	Modulus (GPa)		Maximum strength (MPa)		Elongation at maximum strength (%)	
	Curing Cycles					
	14 days 23°C	16h @ 60°C	14 days 23°C	16h @ 60°C	14 days 23°C	16h @ 60°C
1020 / 1023S	2.60	2.66	76.2	81.0	4.2	4.4
1020 / 1024S	2.76	2.86	84.9	90.2	4.4	4.6
1020 / 1025S	2.71	2.78	84.4	87.8	4.5	4.7
1020 / 1026S	2.65	2.75	86.3	89.3	4.6	4.8
1020 / 1028S	3.00	3.07	97.0	100.8	4.7	4.9
1020 / 1029S	2.87	2.94	95.0	100.8	4.0	5.1

PACKAGING

- Plastic jerrycan 1kg + 0.3kg
- Plastic jerrycan 5kg + 1.5kg
- Plastic jerrycan 10kg + 3kg
- Plastic drum 25kg + 7,5kg
- Steel drum 200kg + 2x30kg
- Steel drum 3x200kg + 180kg

TRANSPORT & STORAGE

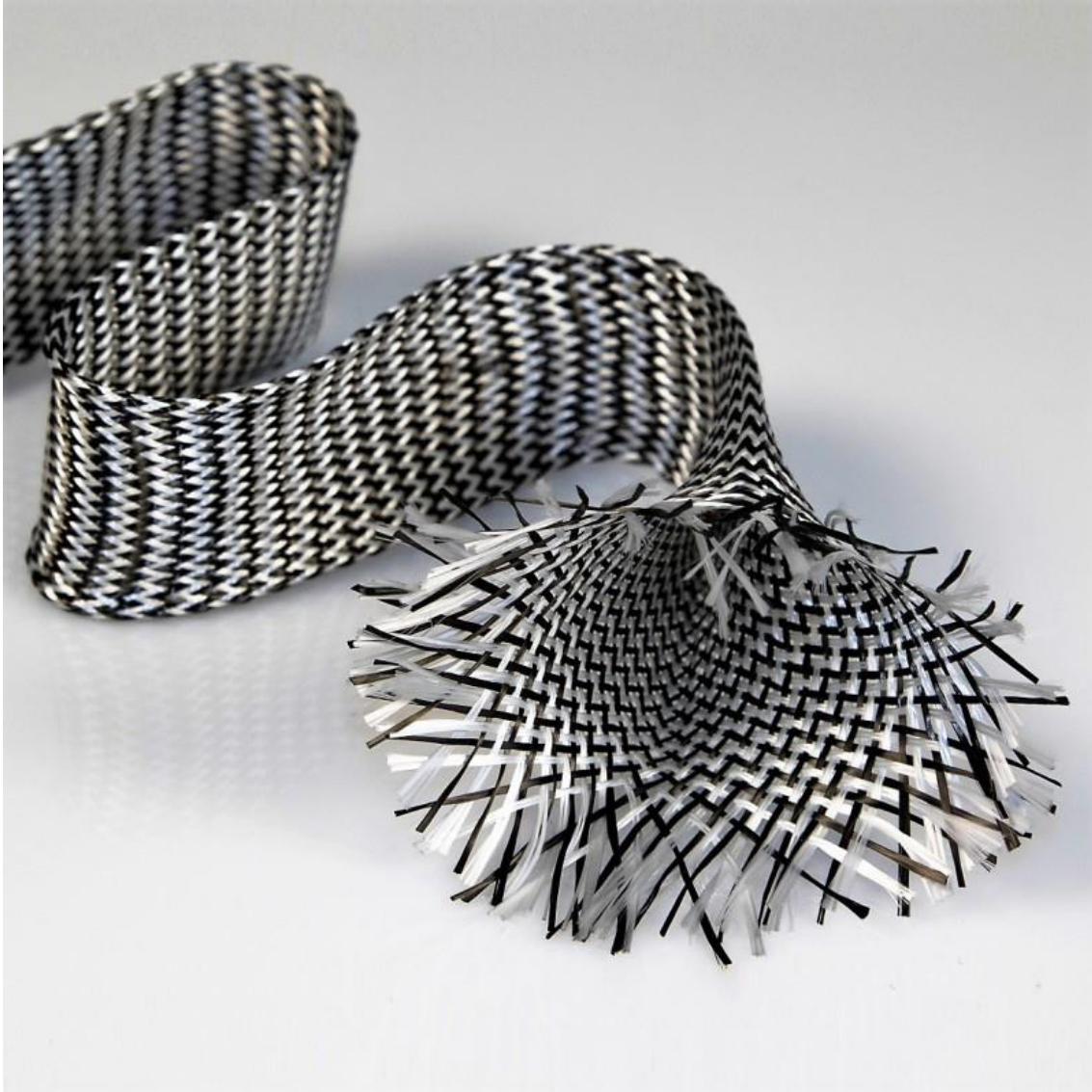
Keep containers sealed and away from heat and cold preferably between 10°C and 30°C in a well ventilated area. Shelf life is minimum one year in sealed containers as provided.

HEALTH & SAFETY

Skin contact must be avoided by wearing protective nitrile gloves & overalls or other protective clothing. Eye protection should be worn to avoid risk of resin or hardener entering the eyes. If this occurs, flush the eye with water for 15 minutes, holding the eyelid open, and seek medical attention. Ensure adequate ventilation in work areas. Respiratory protection should be worn with ABEKP coded filters. RESOLTECH issues full Material Safety Data Sheet for all hazardous products. Please ensure that you have the correct MSDS to hand for the materials you are using before commencing work.

Nota : The data provided in this document are provided good-faith and are based on the test in laboratory and our practical experience and is believed to be accurate. Considering the application of our products gets away from our control, we do not accept any responsibility over the mishandling of these products and our liability is limited strictly to the value of the products we manufacture and supply.

Malla de carbono/vidrio tubular de 40 mm y 39,80 g/m lineal para Palas de Padel



Malla de carbono y vidrio tubular de 40 mm de diámetro y 39,80 g/m lineal. Ideal para la fabricación de palas de padel y tubos de carbono/vidrio empleando resinas epoxi, uretano-acríficas y viniléster.

Tipo suministro

Malla de carbono/vidrio tubular de 40 mm y 39,80 g/m lineal x 1 m, suministrada en bolsa de plástico

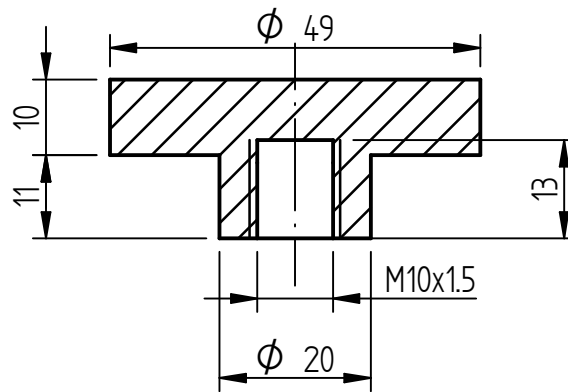
Malla de carbono/vidrio tubular de 40 mm y 39,80 g/m lineal x 5 m suministrada, en bolsa plástica

Malla de carbono/vidrio tubular de 40 mm y 39,80 g/m lineal x 25 m, suministrada en bolsa plástica

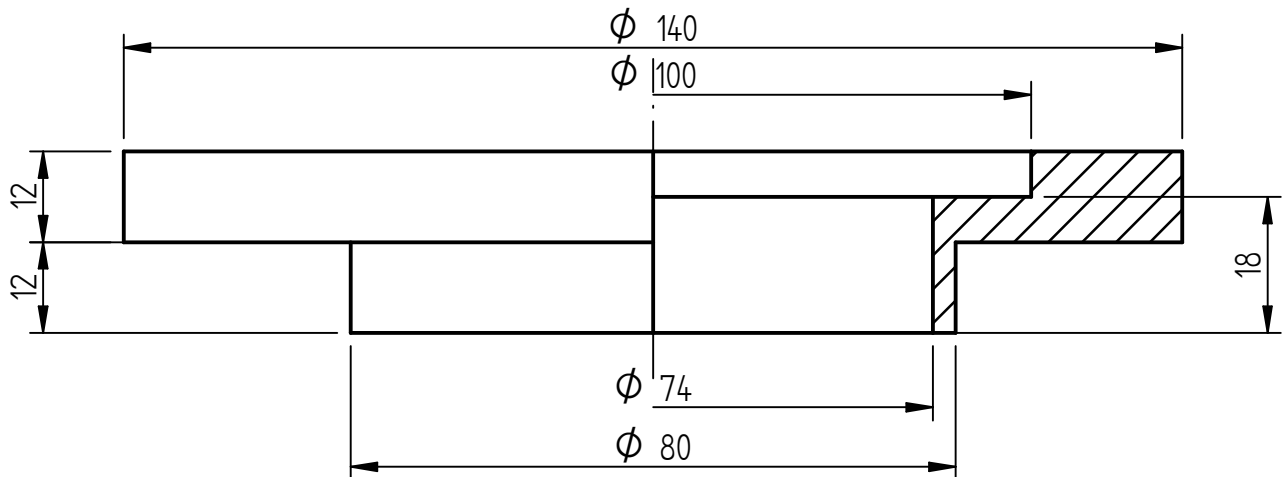
Properties	Status	Norm	Unit	Average	Min	Max
General						
Thickness	**	ISO-1923	mm	40,00	37,60	42,40
Area weight	**	Internal	g/m2	1120	940	1300
Apparent density	**	ISO-845	kg/m3	28,0	25,2	30,8
Tensile Strength @ 23°C *)						
lengthwise at break	P	ISO-1926	kPa	370	280	460
crosswise at break	P			320	240	400
Tensile Elongation @ 23°C *)						
lengthwise	P	ISO-1926	%	250	180	320
crosswise	P			260	180	340
Compression Stress/Strain, S						
deflection 25%	P	ISO-3386-1	kPa	36	25	47
deflection 40%	P			70	49	91
deflection 50%	P			100	70	130
Compression Set						
deflection 25%, 1/2h after discharge	P	ISO-1856-C	%	18	13	23
deflection 25%, 24h after discharge	P			11,1	7,8	14,4
Thermal Stability						
Max. Temperature	P	Internal	°C			70
Dimensional change, lengthwise and crosswise	P		%			-5
EN ISO 11925-2 Ignitability						
Test comply with Norm		EN ISO 11925-2		No	No	No
Shore Hardness						
Shore A	P	ISO 868-1985		6	5	7
Shore 0	P	ASTM D2240		11	10	12
Shore 00	P			42	38	46
Water Absorption						
vol % water absorption		ISO 2896	%			1

Planos

PIEZA 01: IMPACTADOR EN FORMA DE SETA

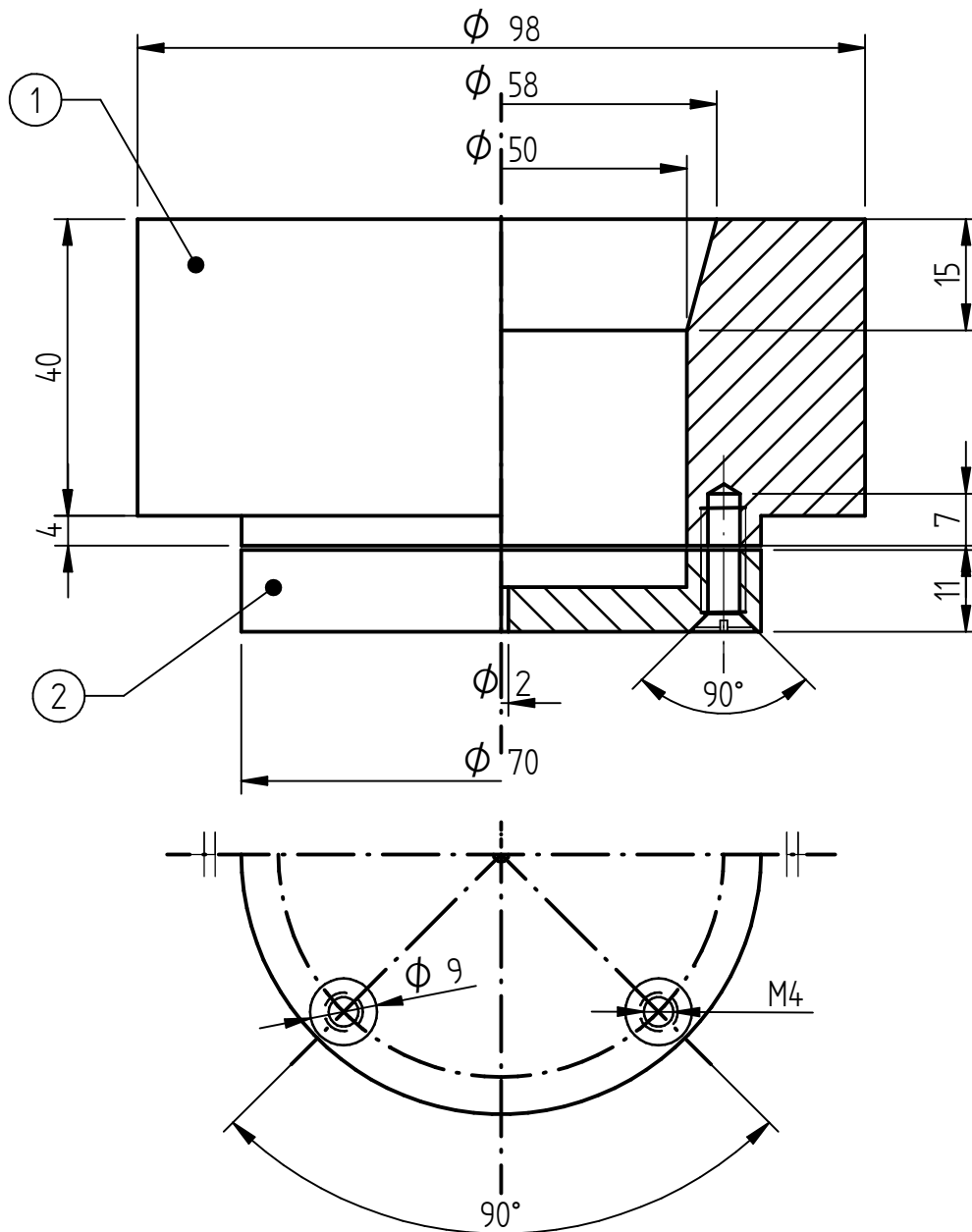


PIEZA 02: PIEZA DE SUJECCIÓN



 <p>EPS Escuela Politécnica Superior Universidad de Málaga</p>	CARACTERIZACIÓN Y SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ANTE IMPACTO DE ESTRUCTURAS COMPUESTAS TIPO SÁNDWICH . PROPUESTA METODOLÓGICA PARA UN CASO REAL: PALA DE PÁDEL		
	Trabajo Fin de Grado - Ingeniería Mecánica		
	Dibujado	Sergio Caballero Encinas	Firma:
	Tutor	Germán Castillo López	
	Cotutor	Felipe García Sánchez	
	PLANO Nº 01	IMPACTADOR EN FORMA DE SETA Y PIEZA DE SUJECCIÓN	
FECHA	MÁLAGA, 25 AGOSTO 2016	ESCALA 1:1	

UTILLAJE PARA SUJECIÓN DE LA ESPUMA



Tapa del utillaje para sujeción	2
Cuerpo del utillaje para sujeción	1
Pieza	Número

 <p>EPS Escuela Politécnica Superior Universidad de Málaga</p>	CARACTERIZACIÓN Y SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ANTE IMPACTO DE ESTRUCTURAS COMPUESTAS TIPO SÁNDWICH . PROPUESTA METODOLÓGICA PARA UN CASO REAL: PALA DE PÁDEL		
	Trabajo Fin de Grado - Ingeniería Mecánica		
	Dibujado	Sergio Caballero Encinas	Firma:
	Tutor	Germán Castillo López	
	Cotutor	Felipe García Sánchez	
	PLANO N° 02	UTILLAJE PARA SUJECIÓN DE LA ESPUMA	
FECHA	MÁLAGA, 25 AGOSTO 2016	ESCALA 1:1	