



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Correlación numérico-experimental del comportamiento a impacto de una pala de pádel

Tutores: Germán Castillo López &
Felipe García Sánchez

Asignatura: Trabajo de Fin de Grado

Departamento de Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación

Curso Académico: 2016-2017

Autor :

Adrián Antonio Moli Díaz

MÁLAGA, junio de 2017

A mi familia, novia, amigos y en memoria de Salva

Agradecimientos

A mis padres, que nunca dudaron de mí y dieron todo lo que pudieron y más por hacer esto realidad, soy quien soy gracias a ellos.

A mi pareja, Marta, por ser el hombro en el que apoyarme en los momentos más difíciles, gracias por todo el cariño y los consejos que me das siempre.

A mis amigos de siempre, por los momentos de desconexión y risas, fundamentales en mi vida y mis estudios.

A Jorge Ayala, por su colaboración en este trabajo y por ser el apoyo que es para mí.

A Pedro Alba, por ser quien me inspiró a amar la ingeniería.

Por supuesto a mis tutores, Dr. Germán Castillo López y Dr. Felipe García Sánchez, a quienes he llegado a ver más que a mis padres y jamás han tenido un solo reproche, no existen más que palabras de agradecimiento hacia vosotros.

Resumen

Correlación numérico-experimental del comportamiento a impacto de una pala de pádel

Palabras clave: Elementos finitos, materiales compuestos, vidrio, carbono, lámina, explícito, implícito, impacto, mallado, pádel, ensayo, estático, Patran, Nastran, LS-Prepost.

La importancia del deporte en nuestra sociedad, hace necesaria la implicación de la ingeniería en este ámbito. El pádel en concreto, es el deporte que más ha crecido en los últimos años, de este auge nace el trabajo realizado, gracias a la colaboración de la empresa *Shark Pádel* y la *Universidad de Málaga*.

Se comenzará con la exposición teórica e introductoria del tema a analizar, comenzaremos hablando del pádel, de la influencia que tienen los modelos de palas en el juego, tanto a nivel *amateur* como profesional. Posteriormente pasaremos a describir nuestra pala de estudio, la pala *Marvel*, además de sus componentes tales como la fibra de carbono, fibra de vidrio, la espuma o el *braiding*. Una vez expuesta nuestra pala, se dará una base teórica que sirva de comprensión al lector sobre el tema que se trata, se hablará de propiedades y características de materiales compuestos, el método de los elementos finitos, tipos de análisis temporales...

Partiendo de la base teórica, pasaremos a los ensayos realizados, dando ciertas nociones teóricas y explicando el proceso llevado a cabo. Se realizarán ensayos cuasi-estáticos, para caracterizar la rigidez de nuestra pala, ensayos de al-

ta velocidad (impacto), para tratar de simular un golpe sobre la propia pala y ensayos para la caracterización de la espuma, debido a que se trata de un material con propiedades variables, serán necesarios varios ensayos a distintas velocidades de aplicación de carga.

Terminaríamos la parte experimental del presente trabajo y pasaríamos a la numérica, donde se simulan los ensayos realizados sobre la pala. En primer lugar trataremos de caracterizar el comportamiento estático de la pala, con el objetivo de minimizar el error producido cuando pasemos al análisis complejo de impacto, asegurando de tener bien caracterizados los materiales componentes de nuestro modelo. En segundo lugar, trataremos de caracterizar el ensayo de impacto realizado en el laboratorio con la máquina de ensayos INSTRON CEAST 9350, utilizando para ambos casos los siguientes softwares:

- Patran: Para la realización geométrica y discretización de nuestro modelo.
- Nastran: Para el análisis y cálculo del problema.

- LS-Prepost: Para la visualización de resultados. fin del avance de la misma tanto para la *Universidad de Málaga* como para la empresa *Shark Pádel*.

El último paso será realizar la correlación, compararemos los resultados obtenidos para el ensayo estático y el dinámico con los obtenidos en las simulaciones, se analizarán dichos resultados y se obtendrán conclusiones.

Posteriormente se sugerirán diferentes líneas futuras de investigación con el

Para finalizar, se recogen distintos apéndices, tanto de fichas técnicas como manuales de ayuda elaborados desde la experiencia, tratando de ayudar al próximo alumno que continúe la investigación, evitando pérdidas de tiempo resolviendo errores.

Abstract

Numerical-experimental co-relationship of behavior subject to a paddle racket strike

Key words: Finite elements, composite materials, glass, carbon, sheet, explicit, implicit, impact, mashed, paddle, test, static, Patran, Nastran, LS-Prepost.

The importance of sport in our society, requires the involvement of engineering in this area. The paddle in particular, is the sport that has grown the most in recent years, from this boom is born the work done, thanks to the collaboration of the company *Shark Pádel* and the *University of Malaga*.

We will begin with the theoretical and introductory exposition of the subject to be analyzed, we will start talking about the paddle, the influence of the models of shovels in the game, both amateur and professional. Later we will describe our study blade, the *Marvel* blade, in addition to its components such as carbon braid, glass fiber, foam or *braiding*. Once exposed our shovel, will be given a theoretical basis that serves as an understanding to the reader on the subject, it will talk about properties and characteristics of materials Composites, the finite element method, types of temporal analysis...

Starting from the theoretical basis, we will pass to the tests carried out, giving certain theoretical notions and explaining the process carried out. We will carry out quasi-static tests, to characterize the rigidity of our shovel, high speed (impact) tests, to try to simulate a blow

on the blade and tests for the characterization of the foam, because it is a material With varying properties, several tests will be required at different loading rates.

We would complete the experimental part of the present work and move on to the numerical one, where the tests performed on the blade are simulated. In the first place we will try to characterize the static behavior of the blade, with the aim of minimizing the error produced when we move to the complex impact analysis, ensuring that the component materials of our model are well characterized. Secondly, we will try to characterize the impact test carried out in the laboratory with the INSTRON CEAST 9350 test machine, using the following software for both cases:

- Patran: For the geometric realization and discretization of our model.
- Nastran: For the analysis and calculation of the problem.
- LS-Prepost: For the visualization of results.

The final step will be to perform the correlation, compare the results obtained

for the static and dynamic tests with those obtained in the simulations, analyze those results and draw conclusions.

Later will be suggested different future lines of investigation with the aim of the advance of the same for the *University of Malaga* as for the company *Shark Pádel*.

Finally, different appendices are included, both technical files and help manuals developed from the experience, trying to help the next student to continue the research, avoiding wasted time solving errors.

Índice general

Agradecimientos	III
Resumen	V
Abstract	VII
1. Antecedentes	1
2. Objetivos generales y planificación	3
3. La pala de pádel [5]	5
1. Introducción	5
2. Partes componentes de una pala de pádel	5
3. Materiales usuales en una pala de pádel	6
4. Tipos de palas de padel en función de su forma	7
5. Selección recomendada de una pala de pádel	8
4. La pala de pádel <i>MARVEL</i>	9
1. Introducción	9
2. Descripción geométrica y materiales empleados	9
3. Proceso de fabricación [3]	13
3.1. Elaboración y cortes de capas	14
3.2. Molde de silicona	14
3.3. Aplicación de resina	14
3.4. Preparación del <i>Braiding</i>	15
3.5. Posicionamiento de los materiales sobre el molde	15
3.6. Cierre del molde	16
3.7. Llenado del perfil	17
5. Técnicas experimentales	19
1. Introducción	19
1.1. Cadena de medida de desplazamientos	19
1.1.1. Utillaje	20
1.1.2. Guía	21
1.1.3. Tubos de aluminio	21
1.1.4. Placa inferior	22
1.1.5. Calzos de acero	23
1.1.6. Pala de pádel	24
1.1.7. Placa superior	24
1.1.8. Resumen de tornillería y ruerkas utilizado	25
1.1.9. Máquina de ensayo de flexión	25
1.1.10. Adquisición de datos	29

2.	Máquina de caída de dardo	31
2.1.	Utillaje	31
2.2.	Máquina de ensayo de impacto	31
2.2.1.	Puesta a punto del ensayo de impacto	31
2.2.2.	Adquisición de datos	34
 6. Introducción a los materiales compuestos		37
1.	Introducción a los materiales compuestos [14]	37
2.	Fibra y Matriz	37
3.	Clasificación de los materiales compuestos	38
4.	Materiales laminados	40
5.	Formas de elaboración de los tejidos	41
6.	Estructuras tipo <i>Sándwich</i>	43
7.	Isotropía y anisotropía	44
7.1.	Materiales isótropos	45
7.2.	Materiales anisótropos	46
8.	Estimación de propiedades	47
8.1.	Micromecánica de los materiales compuestos	48
8.2.	Estimación de propiedades fuera del plano	50
9.	Espuma	53
10.	Criterio de Fallo de Tsai-Wu [19]	56
11.	Aplicaciones de los materiales compuestos	59
 7. Caracterización y evaluación de propiedades de los materiales		61
1.	Espuma	61
2.	Pieles	61
3.	Braiding	64
 8. Método de los elementos finitos		67
1.	Introducción	67
2.	Cálculo estático lineal	71
3.	Cálculo de impacto	73
4.	Discretización temporal	76
4.1.	Método implícito	76
4.2.	Método explícito	77
4.2.1.	Justificación de la elección del método explícito	80
 9. Modelo de elementos finitos		83
1.	Modelo de simulación en Patran-Nastran	83
1.1.	Geometría	83
1.1.1.	Pala de Pádel	83
1.1.2.	Impactador	84
1.1.3.	Simplificaciones geométricas realizadas	85
1.2.	Materiales - Modelo estático	87
1.2.1.	Espuma	87
1.2.2.	Fibra de carbono sarga 2x2 de 3K y 200 g/m^2 con ensimaje epoxi	87
1.2.3.	Vidrio de las pieles	88

1.2.4.	Malla de carbono tubular de 40 mm y 39,80 g/m lineal para Palas de Padel	88
1.2.5.	Malla de vidrio tubular de 40 mm y 39,80 g/m lineal para Palas de Padel	88
1.3.	Materiales - Modelo dinámico	89
1.3.1.	Espuma	89
1.3.2.	Fibra de carbono sarga 2x2 de 3K y 200 g/m ² con ensimaje epoxi	89
1.3.3.	Vidrio de las pieles	90
1.3.4.	Malla de carbono tubular de 40 mm y 39,80 g/m lineal para Palas de Padel	90
1.3.5.	Malla de vidrio tubular de 40 mm y 39,80 g/m lineal para Palas de Padel	91
1.3.6.	Impactador	91
1.4.	Laminados realizados	91
1.5.	Condiciones de contorno	92
1.5.1.	Modelo estático	92
1.5.2.	Modelo dinámico	92
1.6.	Elementos empleados	94
1.6.1.	Elementos volumétricos tipo CHEXA y CPENTA	94
1.6.2.	Elementos superficiales tipo CQUAD y CTRIA	95
1.7.	Mallado	95
1.7.1.	Mallado del modelo estático	96
1.7.2.	Mallado del modelo dinámico	97
1.8.	Orientación de los elementos	98
1.9.	Energía de Hourglass	100
1.10.	Convergencia de malla	101
1.10.1.	Modelo estático	101
1.10.2.	Modelo dinámico	102
 10.Ensayos sobre la pala		103
1.	Ensayos de rigidez estática	103
1.1.	Codificación de los ensayos	103
1.2.	Descripción del ensayo	104
1.2.1.	Ensayo a flexión simple en el centro de la pala	104
1.2.2.	Ensayo de torsión	108
1.3.	Ensayo de flexión con carga aplicada en el extremo	110
1.4.	Resultados	111
1.4.1.	FC - Fuerza centrada	111
1.4.2.	FE - Fuerza en el extremo	116
1.4.3.	TOR - Ensayo de torsión	117
1.5.	Conclusiones obtenidas del ensayo cuasi-estático	118
2.	Ensayos de impacto	119
2.1.	Configuración del ensayo	119
2.2.	Resultados	123
2.3.	Conclusiones obtenidas del ensayo dinámico	128

11. Correlación numérico-experimental	129
1. Modelo estático	129
1.1. Ensayos de fuerza centrada	129
1.2. Ensayos de fuerza aplicada en el extremo	134
2. Modelo dinámico	135
3. Extensión de nuestro modelo numérico a otros modelos de Pala	137
3.1. Pala Marvel SPAIN F300	137
3.2. Pala Green Spain M300	138
3.3. Pala Wasp Spain WT300	139
3.4. Comparación y análisis entre distintas palas	140
12. Conclusiones	141
13. Líneas futuras	143
Bibliografía	145
Apéndices	147
A. Manual de parametrización en Patran	149
1. Introducción	149
2. Geometría	150
3. Parametrización	151
4. Archivo .txt de parametrización final	154
B. Archivos generados por Nastran	155
1. Introducción	155
2. Tipos de archivos	155
2.1. .BDF	155
2.2. .F06	156
2.3. .dytr.out	156
2.4. .D3PLOT	157
2.5. .binout	157
C. Resultados obtenidos del ensayo cuasi-estático	159
1. Rigidez	159
2. Deformada de las palas	186
D. Resultados obtenidos del ensayo de impacto	189
E. Fichas técnicas de materiales empleados	193
F. Catálogo Shark Pádel	205
G. Hoja de calibración de los LVDT	209
H. Planos de utillaje	213
1. Placa de acero superior	214
2. Placa de acero inferior	215
3. Tubo de aluminio superior	216

4.	Tubo de aluminio inferior	217
5.	Utillaje - Guías	218
6.	Esquema montaje	219

Índice de figuras

2.1.	Diagrama de Gantt de la elaboración del presente TFG	4
3.1.	Partes de una pala de pádel	5
3.2.	Tipos de pala en función de su forma	7
4.1.	Caraterización de la geometría de la pala MARVEL	9
4.2.	Cortes realizados para la comprensión de la caracterización geométrica	10
4.3.	Caraterización de la geometría de la pala MARVEL - Mango	10
4.4.	Caraterización de la geometría de la pala MARVEL - Perfil	11
4.5.	Caraterización de la geometría de la pala MARVEL - Golpeo	11
4.6.	Corte C-C' de detalle de geometría del corazón	12
4.7.	Pared intermedia ocasionada por el auto-contacto del <i>Braiding</i>	13
4.8.	Capas de fibra de vidrio y carbono cortadas a su forma final para diferentes palas.	14
4.9.	Aplicación de resina sobre las primeras capas de fibra de vidrio.	14
4.10.	Aplicación de resina sobre las primeras capas de fibra de vidrio.	15
4.11.	Aplicación de resina sobre el <i>Braiding</i>	15
4.12.	Proceso de cierre del molde de la Pala	16
4.13.	Molde cerrado donde se observa el orificio de introducción de aire.	17
4.14.	Nudo realizado en el tubo para poder ejercer la presión deseada.	17
4.15.	Pala de pádel proporcionadas por <i>Shark Pádel</i>	18
5.1.	Esquema montaje del utillaje empleado para los ensayos cuasi-estáti- cos y dinámicos sobre la pala de pádel	21
5.2.	Guía de máquina de flexión y de impacto de la marca <i>SERVOSIS</i>	21
5.3.	Tubos de aluminio 45x45 L usado para la fijación y traslación del empotramiento en el utillaje	22
5.4.	Placa inferior de sujeción del utillaje del empotramiento de la pala obtenida a partir de mecanizado	23
5.5.	Disposición de calzos para evitar el estallamiento del mango de la pala	24
5.6.	Placa superior de sujeción del utillaje del empotramiento de la pala obtenida a partir de mecanizado	24
5.7.	Tornillería usada en la fijación de elementos del utillaje empleado para los ensayos	25
5.8.	Medidores de precisión digital, LVDT	25
5.9.	Luz blanca de activación de máquina de flexión	26
5.10.	Fuente de alimentación de la máquina de flexión	26
5.11.	Panel de control de la célula en la máquina de flexión	27

5.12. Pantalla de control de posicionamiento y velocidad de la máquina de flexión	27
5.13. Panel de control manual de movimiento de la máquina de flexión . . .	28
5.14. Puesta en Marcha del motor para el ensayo de flexión	28
5.15. Esquema de conexión del cableado necesario para la medición de los LVDT externos de <i>Solartron Metrology</i>	29
5.16. Adquisición de datos simultánea de los LVDT con el y la máquina de ensayo mediante los softwares P2K y NI SignalExpress	30
5.17. Máquina de ensayo de impacto modelo CEAST 9350 de la empresa INSTRON	31
5.18. Fijación de posición de nuestro objeto de ensayo en Ceast 9350	32
5.19. Sensor de la máquina de impacto Ceast 9350	33
6.1. Clasificación de los materiales compuestos	39
6.2. Esquema de composición de un compuesto laminado	40
6.3. Diferentes formas de elaboración de tejidos de materiales compuestos [19]	41
6.4. Esquemización de una estructura tipo <i>Sándwich</i>	43
6.5. Ejemplo de aumento de la rigidez de una estructura tipo <i>Sandwich</i> .	43
6.6. Diferencia entre comportamiento isótropo y anisótropo 2 [14]	44
6.7. Variación del módulo de elasticidad en función del desfase carga-orientación de fibra	45
6.8. Ejes tomados para la formulación [14]	45
6.9. Esquemización del ensayo de tracción para la obtención de propiedades.	48
6.10. Aproximación del modelo de isotensión e isodeformación	50
6.11. Esquema de un material compuesto unidireccional	51
6.12. Esquema propiedades material unidireccional	51
6.13. Esquema plano XZ propiedades	51
6.14. Último esquema de propiedades, plano YZ	52
6.15. Material laminado con refuerzo	52
6.16. Esquema con refuerzo de tejido en el plano XY	52
6.17. Esquema refuerzo tejido planos XZ y YZ	53
6.18. Composición genérica de una espuma	53
6.19. Celda cúbica, a) abierta y b) cerrada	54
6.20. Comparación de propiedades de espumas con otros materiales	54
6.21. Gráfica del comportamiento viscoelástico de la espuma [12]	55
6.22. Esquema de ensayo de tracción para el criterio de fallo de Tsai-Wu .	56
6.23. Esquema de ensayo de compresión para el criterio de fallo de Tsai-Wu	57
6.24. Esquema de ensayo de cizalladura para el criterio de fallo de Tsai-Wu	57
6.25. Esquema de ensayo biaxial de tracción para el criterio de fallo de Tsai-Wu	58
6.26. Aumento de producción de la fibra, esencialmente de carbono [14] . .	59
7.1. Braiding usado en la fabricación de la pala de padel compuesto por fibra de carbono y fibra de vidrio	64
7.2. Separación de materiales en el braiding	65
8.1. Comparación pala real ensayada y modelo en elementos finitos	69

8.2. Componentes de un MEF	69
8.3. Relación entre precisión y coste computacional	70
8.4. Comportamiento teórico de un material elástico-lineal	72
8.5. Esquema de no linealidad geométrica debido a la existencia de grandes desplazamientos	73
8.6. Comparación comportamiento material metálico e hiperelástico	74
8.7. Ejemplos de contactos en la ingeniería	74
8.8. Diagrama de flujo del método implícito [10]	77
8.9. Información sobre la línea del tiempo en el método explícito	78
8.10. Flujo de cálculo del método explícito	79
8.11. Comparación de coste computacional entre método explícito y método implícito	80
8.12. Ámbito de aplicación de método explícito e implícito 1	81
8.13. Ámbito de aplicación de método explícito e implícito 2	81
8.14. Ámbito de aplicación de método explícito e implícito 3	82
8.15. Ámbito de aplicación de método explícito e implícito 4	82
9.1. Modelo de partida proporcionado por <i>Shark Pádel</i>	83
9.2. Zonas a simplificar en el modelo de elementos finitos final	84
9.3. Geometría final del modelo en elementos finitos	85
9.4. Comparación simplificación 1 para el mallado en el FEM	85
9.5. Comparación simplificación 2 para el mallado en el FEM	86
9.6. Tarjeta de propiedades de material isótropo MAT1	87
9.7. Tarjeta de propiedades de material ortótropo MAT8	87
9.8. Tarjeta de propiedades de material isótropo MATD001	89
9.9. Tarjeta de propiedades de material ortótropo MATD2OR	90
9.10. Elemento volumétrico tipo CHEXA de 8 nodos	94
9.11. Elemento volumétrico con forma de pentaedro tipo CPENTA de hasta 15 nodos	94
9.12. Elementos superficiales empleados en el modelo de elementos finitos.	95
9.13. Volumen de difícil mallado en el corazón del mango que obliga a un mallado fino en el modelo en elementos finitos	96
9.14. Mallado realizado en el modelo estático en elementos finitos	96
9.15. Modelo en elementos finitos final, mallado realizado	97
9.16. Mallado realizado en el modelo dinámico en elementos finitos	97
9.17. Mallado realizado sobre el impactador en el modelo dinámico	97
9.18. Introducción de la orientación en las propiedades en función de un vector en Patran	98
9.19. Introducción de la orientación en las propiedades en función de los ejes locales en Patran	99
9.20. Orientación de las propiedades introducidas en el modelo de la pala visualizado en Patran	99
9.21. Efecto de Hourglass o reloj de arena en un ejemplo realizado en una superficie cuadrada.	100
9.22. Energía de Hourglass en el modelo dinámico con un impacto de 2.36 J	100
9.23. Convergencia del mallado del modelo estática realizada con desplazamientos en el punto de referencia (LVDT 1) e índice de fallo	101
9.24. Convergencia de malla del modelo dinámico - Fuerza de contacto	102

10.1. Esquema disposición de LVDT y carga FC1	104
10.2. Esquema disposición de LVDT y carga FC2	106
10.3. Esquema disposición de LVDT y carga FC3	107
10.4. Esquema disposición de LVDT y carga TOR-1	108
10.5. Esquema disposición de LVDT y carga TOR-2	109
10.6. Esquema de posición de LVDT y carga, ensayo FE	110
10.7. Curva fuerza-desplazamiento del ensayo cuasi-estático sobre la pala I-A-FC-1-2.	111
10.8. Gráfica de ensayo de rigidez pala III-A-FC-1	111
10.9. Curva de rigidez ensayada sobre la pala II-A-FC-1	112
10.10 Resta de medidas entre LVDT 1 y 0 en I-A-FC-1	113
10.11 Resta de medidas de LVDT 2 y 0 en I-A-FC-2	113
10.12 Deformada media de las palas estudiadas en los ensayos cuasi-estáticos al aplicar la carga en el centro y medir según las posiciones 1 y 3	114
10.13 Curvas fuerza-desplazamiento tomadas en el punto de referencia (LVDT 1) para todos los ensayos de fuerza centrada sobre todas las dos caras de todas las palas.	114
10.14 Curvas fuerza-desplazamiento tomadas en el punto de referencia (LVDT 1) para las dos caras de todas las palas en el ensayo de fuerza centrada obviando el primer ensayo.	115
10.15 Medida LVDT 0 en II-B-FE	116
10.16 Medida LVDT 2 en II-B-FE	116
10.17 Medida I-A-TOR-1-2 justificando la no realización del ensayo de torsión	117
10.18 Pestaña de parámetros iniciales para definición de caso de impacto . .	119
10.19 Pestaña de control de la máquina de ensayo Ceast 930	120
10.20 Pestaña general de CeastView	121
10.21 Foto extraída de vídeo a cámara lenta en Ceast 9350	122
10.22 Fuerza de contacto obtenida en un impacto de 2.36 J en la pala II-B .	123
10.23 Superposición de las gráficas obtenidas para todas las palas en el ensayo de impacto	123
10.24 Absorción de la energía puesta en juego en el ensayo de impacto de 2.36 J en las dos caras de todas las palas	125
10.25 Ensayo de impacto de 2.36 J realizado sobre la pala II-B	126
10.26 Comparación de la fuerza máxima obtenida en el ensayo de impacto para cada una de las caras de todas las palas.	127
10.27 Comparación del tiempo de contacto producido en el impacto para las dos caras de todas las palas.	127
11.1. Correlación numérico-experimental del ensayo estático de fuerza centrada con $E = 0.4$ MPa, midiendo desplazamientos en el LVDT 1 . .	130
11.2. Correlación numérico-experimental del ensayo estático de fuerza centrada con $E = 0.26$ MPa, midiendo desplazamientos en el LVDT 1 . .	130
11.3. Correlación numérico-experimental del punto medido por el LVDT 0 en la posición uno del ensayo de fuerza centrada.	131
11.4. Correlación numérico-experimental de la resta de las medidas de LVDT 1 y LVDT 0 en el ensayo de flexión centrada en la posición 1.	131

11.5. Correlación numérico-experimental de la medida del LVDT 0 en el ensayo de flexión centrada en la posición 2.	132
11.6. Comparación de la deformada del modelo numérico y la experimental de la pala con $E = 0.4$ MPa	133
11.7. Comparación de la deformada del modelo numérico y la experimental de la pala con $E = 0.26$ MPa	133
11.8. Correlación numérico-experimental entre el ensayo de fuerza aplicada en el extremo con resultados del LVDT 0 y el modelo numérico.	134
11.9. Correlación numérico-experimental del ensayo de impacto de 2.36 J sobre la pala de pádel Marvel	135
11.10 Correlación numérico-experimental de la fuerza máxima de contacto producida entre cada cara de todas las palas y el modelo en elementos finitos.	136
11.11 Correlación numérico-experimental del tiempo de contacto producido entre cada cara de todas las palas y el modelo en elementos finitos.	136
11.12 Comportamiento a impacto de la pala Marvel Spain F300	137
11.13 Comportamiento a impacto de la pala Green Spain M300	138
11.14 Comportamiento a impacto de la pala Wasp Spain WT300	139
11.15 Comparación del comportamiento a impacto de las distintas palas	140
A.1. Análisis lineal en el ejemplo de parametrización	149
A.2. Geometría creada para el ejemplo de parametrización	150
A.3. Grabado automático de todas las acciones realizadas en Patran	151
A.4. Forma correcta de referenciar a parámetros predefinidos	152
A.5. Semilla creada en nuestra geometría base	152
A.6. Mallado base realizado en el ejemplo de parametrización	153
A.7. Condiciones de contorno aplicadas sobre nuestro modelo de ejemplo	153
C.1. Ensayo cuasi-estático I-A-FC-1-0	159
C.2. Ensayo cuasi-estático I-A-FC-1-1	160
C.3. Ensayo cuasi-estático I-A-FC-1-1-0	160
C.4. Ensayo cuasi-estático I-A-FC-1-2	160
C.5. Ensayo cuasi-estático I-A-FC-2-0	161
C.6. Ensayo cuasi-estático I-A-FC-2-1	161
C.7. Ensayo cuasi-estático I-A-FC-2-2	161
C.8. Ensayo cuasi-estático I-A-FC-2-2-0	162
C.9. Ensayo cuasi-estático I-A-FC-3-0	162
C.10. Ensayo cuasi-estático I-A-FC-3-1	162
C.11. Ensayo cuasi-estático I-A-FC-3-2	163
C.12. Ensayo cuasi-estático I-A-FE-0	163
C.13. Ensayo cuasi-estático I-A-FE-2	163
C.14. Ensayo cuasi-estático I-B-FC-1-0	164
C.15. Ensayo cuasi-estático I-B-FC-1-1	164
C.16. Ensayo cuasi-estático I-B-FC-1-1-0	164
C.17. Ensayo cuasi-estático I-B-FC-1-2	165
C.18. Ensayo cuasi-estático I-B-FC-2-0	165
C.19. Ensayo cuasi-estático I-B-FC-2-1	165
C.20. Ensayo cuasi-estático I-B-FC-2-2	166
C.21. Ensayo cuasi-estático I-B-FC-2-2-0	166

C.22. Ensayo cuasi-estático I-B-FC-3-0	166
C.23. Ensayo cuasi-estático I-B-FC-3-1	167
C.24. Ensayo cuasi-estático I-B-FC-3-2	167
C.25. Ensayo cuasi-estático I-B-FE-0	167
C.26. Ensayo cuasi-estático I-B-FE-2	168
C.27. Ensayo cuasi-estático II-A-FC-1-0	168
C.28. Ensayo cuasi-estático II-A-FC-1-1	168
C.29. Ensayo cuasi-estático II-A-FC-1-1-0	169
C.30. Ensayo cuasi-estático II-A-FC-1-2	169
C.31. Ensayo cuasi-estático II-A-FC-2-0	169
C.32. Ensayo cuasi-estático II-A-FC-2-1	170
C.33. Ensayo cuasi-estático II-A-FC-2-2	170
C.34. Ensayo cuasi-estático II-A-FC-2-2-0	170
C.35. Ensayo cuasi-estático II-A-FC-3-0	171
C.36. Ensayo cuasi-estático II-A-FC-3-1	171
C.37. Ensayo cuasi-estático II-A-FC-3-2	171
C.38. Ensayo cuasi-estático II-A-FE-0	172
C.39. Ensayo cuasi-estático II-A-FE-2	172
C.40. Ensayo cuasi-estático II-B-FC-1-0	172
C.41. Ensayo cuasi-estático II-B-FC-1-1	173
C.42. Ensayo cuasi-estático II-B-FC-1-1-0	173
C.43. Ensayo cuasi-estático II-B-FC-1-2	173
C.44. Ensayo cuasi-estático II-B-FC-2-0	174
C.45. Ensayo cuasi-estático II-B-FC-2-1	174
C.46. Ensayo cuasi-estático II-B-FC-2-2	174
C.47. Ensayo cuasi-estático II-B-FC-2-2-0	175
C.48. Ensayo cuasi-estático II-B-FC-3-0	175
C.49. Ensayo cuasi-estático II-B-FC-3-1	175
C.50. Ensayo cuasi-estático II-B-FC-3-2	176
C.51. Ensayo cuasi-estático II-B-FE-0	176
C.52. Ensayo cuasi-estático II-B-FE-2	176
C.53. Ensayo cuasi-estático III-A-FC-1-0	177
C.54. Ensayo cuasi-estático III-A-FC-1-1	177
C.55. Ensayo cuasi-estático III-A-FC-1-1-0	177
C.56. Ensayo cuasi-estático III-A-FC-1-2	178
C.57. Ensayo cuasi-estático III-A-FC-2-0	178
C.58. Ensayo cuasi-estático III-A-FC-2-1	178
C.59. Ensayo cuasi-estático III-A-FC-2-2	179
C.60. Ensayo cuasi-estático III-A-FC-2-2-0	179
C.61. Ensayo cuasi-estático III-A-FC-3-0	179
C.62. Ensayo cuasi-estático III-A-FC-3-1	180
C.63. Ensayo cuasi-estático III-A-FC-3-2	180
C.64. Ensayo cuasi-estático III-A-FE-0	180
C.65. Ensayo cuasi-estático III-A-FE-2	181
C.66. Ensayo cuasi-estático III-B-FC-1-0	181
C.67. Ensayo cuasi-estático III-B-FC-1-1	181
C.68. Ensayo cuasi-estático III-B-FC-1-1-0	182
C.69. Ensayo cuasi-estático III-B-FC-1-2	182

C.70. Ensayo cuasi-estático III-B-FC-2-0	182
C.71. Ensayo cuasi-estático III-B-FC-2-1	183
C.72. Ensayo cuasi-estático III-B-FC-2-2	183
C.73. Ensayo cuasi-estático III-B-FC-2-2-0	183
C.74. Ensayo cuasi-estático III-B-FC-3-0	184
C.75. Ensayo cuasi-estático III-B-FC-3-1	184
C.76. Ensayo cuasi-estático III-B-FC-3-2	184
C.77. Ensayo cuasi-estático III-B-FE-0	185
C.78. Ensayo cuasi-estático III-B-FE-2	185
C.79. Deformada obtenida mediante los ensayos de flexión centrada en la pala I-A	186
C.80. Deformada obtenida mediante los ensayos de flexión centrada en la pala I-B	186
C.81. Deformada obtenida mediante los ensayos de flexión centrada en la pala II-A	187
C.82. Deformada obtenida mediante los ensayos de flexión centrada en la pala II-B	187
C.83. Deformada obtenida mediante los ensayos de flexión centrada en la pala III-A	188
C.84. Deformada obtenida mediante los ensayos de flexión centrada en la pala III-B	188
D.1. Resultados obtenidos del ensayo de impacto centrado en la máquina Ceast 9350 - Pala I-A	189
D.2. Resultados obtenidos del ensayo de impacto centrado en la máquina Ceast 9350 - Pala I-B	190
D.3. Resultados obtenidos del ensayo de impacto centrado en la máquina Ceast 9350 - Pala II-A	190
D.4. Resultados obtenidos del ensayo de impacto centrado en la máquina Ceast 9350 - Pala II-B	191
D.5. Resultados obtenidos del ensayo de impacto centrado en la máquina Ceast 9350 - Pala III-A	191
D.6. Resultados obtenidos del ensayo de impacto centrado en la máquina Ceast 9350 - Pala III-B	192

Índice de tablas

3.1. Selección aconsejada de pala de pádel	8
6.1. Resultados del ejemplo de aumento de rigidez	44
6.2. Fracción de volumen de fibra común en función del proceso de moldeo	47
7.1. Resumen de resultados del módulo de elasticidad de la espuma obtenidos por Sergio Caballero Encinas	61
7.2. Estimación de propiedades por micromecánica en la fibra de carbono	62
7.3. Estimación de propiedades por micromecánica en la fibra de vidrio	63
7.4. Estimación de propiedades por micromecánica de láminas unidireccionales	66
9.1. Propiedades introducidas en Nastran para la espuma	87
9.2. Propiedades introducidas en Nastran para el carbono equilibrado	88
9.3. Propiedades introducidas en Nastran para el vidrio equilibrado	88
9.4. Propiedades introducidas en Nastran para el carbono unidireccional	88
9.5. Propiedades introducidas en Nastran para el carbono unidireccional	89
9.6. Propiedades introducidas en Nastran para la espuma SOL700	89
9.7. Propiedades introducidas en Nastran para el carbono equilibrado SOL700	90
9.8. Propiedades introducidas en Nastran para el vidrio equilibrado SOL700	90
9.9. Propiedades introducidas en Nastran para el carbono unidireccional SOL700	90
9.10. Propiedades introducidas en Nastran para el carbono unidireccional SOL700	91
9.11. Propiedades introducidas en Nastran para la espuma SOL700	91

Capítulo 1

Antecedentes

Este Trabajo de Fin de Grado nace del auge del deporte en la época actual, son cada vez mayores los avances e investigaciones en éste área con el fin de proporcionar al usuario un mayor confort y una mayor seguridad en la ejecución del deporte a realizar, tanto a nivel intermedio como a nivel profesional, éstos últimos tienen gran dependencia de los avances conseguidos en el útil a emplear en su oficio.

Las mejoras en el ámbito del deporte pueden marcar la diferencia, así por ejemplo, se puede observar en deportes como la Fórmula 1, dónde las carrocerías están en continuo proceso de mejora con el fin de conseguir un vehículo milésimas de segundo más rápido que el del adversario. Del mismo modo, el fin de éste Trabajo de Fin de Grado es, la investigación en el comportamiento y caracterización de los materiales compuestos que constituyen una pala de pádel, cuyo proceso tiene como origen el convenio que existe entre la *Universidad de Málaga*, por medio del *Dr. D. Germán Castillo López* y la empresa *Shark Pádel*.

Shark Pádel es una empresa malagueña, la cual se dedica a la elaboración, producción y distribución de material deportivo asociado con el pádel. En dicho proceso, se han encontrado con problemas a la hora de la elección y disposición de materiales, por ejemplo, el tipo de espuma a emplear cambia considerablemente las sensaciones en el profesional que los prueba a modo de test, nuestro objetivo será, caracterizar qué sucede con el cambio de propiedades de los materiales que aparecen en una pala.

Debido al proceso de mejora, tanto ingenieros como especialistas en el pádel, debemos trabajar como equipo ya que, como ingenieros, seremos capaces de justificar aumentos o disminuciones de propiedades, pero serán los profesionales del pádel los que traducirán estas variaciones en sensaciones, ya que, a fin y al cabo, son éstas las que decidirán cuán bueno es un producto.

Este proyecto se trata de una continuación del estudio de anteriores alumnos, con el cual se pretende continuar con la investigación mediante la modelización de una pala de pádel proporcionada por *Shark Pádel*, y la realización posterior de ensayos, con el fin de poder caracterizar la misma, analizarla, y poder tomar decisiones en cuanto a la composición de los materiales.

Capítulo 2

Objetivos generales y planificación

El objetivo de este Trabajo de Fin de Grado, será, como indica su título, la modelización y caracterización del comportamiento de una pala de pádel, con el fin de poder tomar decisiones de diseño que conlleven una mejora del comportamiento de la misma.

Para ello, partimos de los modelos en bruto proporcionados por la empresa Shark Pádel, los cuáles se ensayarán y se realizará un modelo de elementos finitos para el análisis computacional.

Para la consecución de este trabajo, se deberán cumplir los siguientes sub-objetivos:

- Elaboración del modelo de elementos finitos que servirá para su futuro estudio y mejora.
- Simulación del comportamiento estático del modelo de elementos finitos para obtener propiedades de rigidez tanto a flexión como a torsión.
- Simulación del comportamiento dinámico del modelo de elementos finitos en el que se simulará el impacto de una bola real en la pala en distintas posiciones, intentando asemejarse lo más posible a un golpe real.
- Elaboración del utillaje necesario para el ensayo del modelo real de la pala de pádel.
- Ensayo de flexión y ensayo de torsión de la pala de pádel para su posterior comprobación con el modelo con el fin de su validación.
- Ensayo de impacto (dinámico) del modelo real una vez se ha validado el comportamiento estático del mismo, debido a que, el problema dinámico incluye numerosas variables y no linealidades, por lo que, en principio, debemos partir de un modelo estático equivalente.

Estos objetivos son un reto a cumplir, ya que el futuro de la empresa *Shark Pádel* puede depender en gran medida de este estudio, pudiéndose diferenciar del resto si los resultados finales son positivos.

La consecución exitosa de este Trabajo de Fin de Grado, podría suponer un gran avance, debido a que podría indagar en la influencia de parámetros en los cuales ni siquiera grandes empresas en el mismo campo se centran, tales como la influencia del número y tamaño de orificios, comportamiento a fatiga, etc.

Por último y a nivel personal, este Trabajo de Fin de Grado sirve para el interés hacia la investigación y planes futuros de consecución de Máster y Doctorado.

Plan de trabajo

1. Estudio de la fabricación, composición y comportamiento de los materiales compuestos.
2. Estudio del software de elementos finitos *Patran-Nastran*.
3. Realización del modelo de elementos finitos de la pala de pádel.
4. Estudio y simulación tanto estática como dinámica del modelo.
5. Diseño y fabricación del utillaje a emplear en los ensayos.
6. Realización de ensayos (Tanto estático como dinámicos) y validación del modelo.
7. Análisis y tratamiento de resultados.
8. Correlación numérico-experimental.
9. Elaboración de la memoria que recoja con detalle el contenido del Trabajo de Fin de Grado realizado.

La planificación seguida para las diferentes tareas se puede observar en la Figura 2.1:

		Febrero			Marzo				Abril				Mayo			Junio			
SEMANA		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
TAREA	1	■	■	■															
	2		■	■	■	■	■												
	3		■	■	■	■													
	4					■	■	■	■										
	5						■	■	■	■									
	6								■	■	■	■							
	7									■	■	■	■	■	■	■			
	8													■	■	■	■	■	
	9																■	■	■

Figura 2.1: Diagrama de Gantt de la elaboración del presente TFG

Capítulo 3

La pala de pádel [5]

1. Introducción

En el presente apartado, se darán nociones básicas de las partes constituyentes de una pala de pádel general, con el fin de familiarizarnos con los conceptos deportivos y así poder tener cierto rigor a la hora de la investigación realizada.

2. Partes componentes de una pala de pádel

En la Figura 3.1 se muestran las partes esenciales de una pala de pádel, a continuación, pasamos a detallarlas.

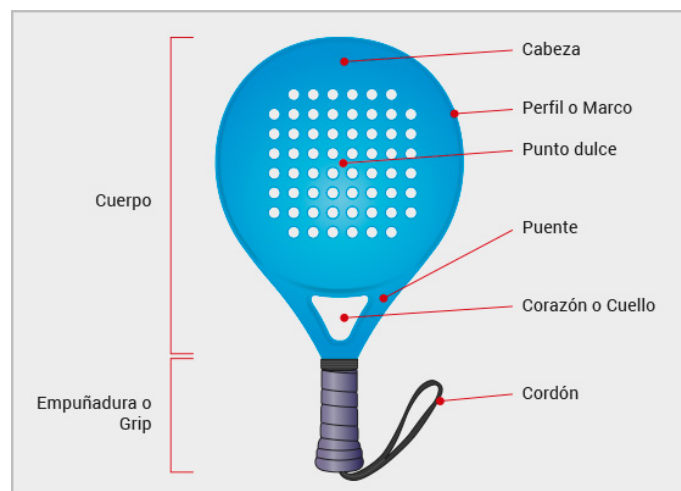


Figura 3.1: Partes de una pala de pádel

- **Empuñadura o grip:** Es la zona de sujeción de la pala, suele ser de talla única. Denominamos *overgrip* a la propia zona de sujeción que se desgasta con el uso, por ello, cuando se produce cierto desgaste, al ser una zona esencial, se recomienda su cambio.
- **Cuerpo de la pala:** Abarca toda la superficie de la pala, y es el objeto de estudio principal del presente Trabajo de Fin de Grado.

- **Corazón o cuello de la pala:** Ésta parte de la pala, solo es de uso real cuando se usa a nivel profesional para realizar el cambio de empuñadura entre golpe y golpe. A nivel aficionado, no es más que decorativo, tanto es así que su forma no está estandarizada, pudiendo buscarse más un aspecto estético que útil.
- **Puente:** Aporta rigidez y solidez a la pala, se diseña de forma que se reduzcan las vibraciones posibles.
- **Perfil:** Es la parte externa que envuelve la pala, tiene una función similar al puente, darle la rigidez necesaria a la pala que no puede conseguirse con el mero empleo de espuma.
- **Superficie de golpeo:** Como su propio nombre indica, es la causante del golpeo con la bola, tiene que tener un grosor máximo de *38 mm*, compuesta interiormente por espuma y un recubrimiento de pieles. En función del modelo y marca que busquemos, estas pieles pueden variar su composición.
- **Punto dulce:** Es el punto de mayor rendimiento, será la zona con la que se deberá buscar el golpe siempre que sea posible. La situación de este punto varía en función del tipo de pala.

3. Materiales usuales en una pala de pádel

Analizaremos los materiales que suelen constituir cada una de las partes de una pala de pádel:

- **Cordón:** En general, constituido por una cuerda de hilos trenzados adherida a la parte inferior de la pala.
- **Empuñadura:** Suele estar recubierta por un *overgrip* que le aporta agarre y sujeción.
- **Perfil:** Compuesto por materiales ligeros y resistentes al golpe: *carbono, grafito o fibra de vidrio*.
- **Superficie de golpeo:** Materiales similares o incluso idénticos a los empleados en el perfil.
- **Núcleo:** Suele estar compuesta por goma EVA, material viscoelástico que influirá en gran medida en el golpeo y la resistencia de la pala, así, cuanto más blanda sea, mejor sensación de contacto pero menor resistencia tendrá nuestra pala.
- **Protector superior:** No es lo usual, pero en el caso de llevar protector, se situará en el perfil, será un protector de plástico que evitará el rallado de la pala en caso de golpeo con paredes.

4. Tipos de palas de pádel en función de su forma

La forma de una pala de pádel es uno de los factores más influyentes en su comportamiento. Además, es en lo primero que se fija el consumidor, ya que, a simple vista, puede observar si esa pala se ajusta a su juego.

En la Figura 3.2 se muestran los diferentes tipos de pala que detallaremos a continuación.

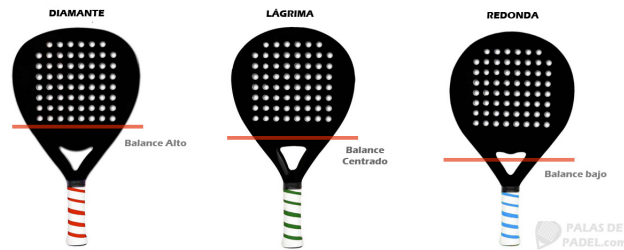


Figura 3.2: Tipos de pala en función de su forma

- **Forma de diamante:** Se caracterizan por tener la parte superior achatada. El peso está distribuido hacia la parte superior de la pala, consiguiéndose un punto pequeño y menos maniobrable, pero con una elevada potencia. Este tipo de palas está orientada a jugadores profesionales cuyo juego se base en una elevada potencia de golpeo debido a su difícil uso.
- **Forma de lágrima:** Es la pala intermedia, son algo más manejables que las de diamante debido a un menor balance. Son las palas más polifacéticas, con unas características generales intermedias.
- **Forma redonda:** Peso distribuido hacia el puño, lo que se traduce en el menor balance y la mayor manejabilidad. Este tipo de palas están enfocadas en jugadores que inician su andadura en el deporte, aunque también es usada por profesionales cuyo juego se basa en el control y precisión.

5. Selección recomendada de una pala de pádel

Una vez se han expuesto unas nociones básicas sobre palas de pádel, el último factor que influye en la selección de una pala apropiada para el usuario es el peso. En general, no es un factor influyente, ya que, las sensaciones que se experimentan con una pala en forma de diamante y una redonda, aún teniendo el mismo peso, son que la de diamante parece más pesada, por ello no es una característica esencial el hecho de escoger una pala ligera o pesada.

En la tabla 3.1 se muestra un cuadro resumen de elección aconsejada de una pala en función a nuestro nivel, tipo de juego, fisionomía...

Tabla 3.1: Selección aconsejada de pala de pádel

Nivel	Peso (hombre)	Peso (mujer)	Estilo de juego	Forma
Iniciación	360-370 g	345-355 g	Control	Redonda
Intermedio	365-375 g	350-360 g	Control	Redonda
	360-370 g	345-355 g	Polifacética	Lágrima
Avanzado	370-390 g	355-375g	Control	Redonda
	365-385 g	350-370 g	Polifacética	Lágrima
	360-380 g	345-365 g	Potencia	Diamante

Capítulo 4

La pala de pádel *MARVEL*

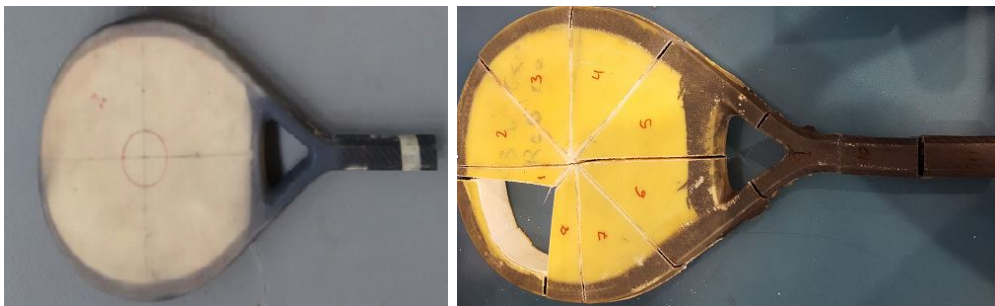
1. Introducción

Ya hemos visto las características de las palas en general, a continuación, vamos a referirnos a las palas *MARVEL* de la empresa *Shark Pádel* que han sido objeto de estudio en este Trabajo de Fin de Grado.

2. Descripción geométrica y materiales empleados

Para el análisis geométrico de nuestra pala de pádel partimos de una pala en sus primeros pasos de fabricación, no tiene agujeros realizados. Esto es esencial ya que queremos caracterizar el comportamiento de la pala base, y en función de ello podremos jugar con dónde y cuántos agujeros situar.

En la Figura 4.1 se muestra nuestra pala al completo, se ve la pala proporcionada, básica, sin agujeros realizados. Se muestran también los cortes realizados sobre la pala para su caracterización geométrica.



(a) Pala modelo Marvel proporcionada por Shark Pádel sin agujeros realizados (b) Cortes a la pala base para caracterizar la geometría

Figura 4.1: Caraterización de la geometría de la pala MARVEL

Para una mayor comprensión de la caracterización geométrica, se ha decidido esquematizar mediante cortes el modelo en *AutoCad*, en la Figura 4.2, mostramos los cortes que se van a realizar.

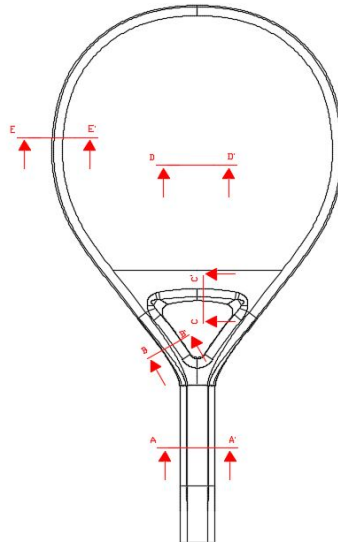
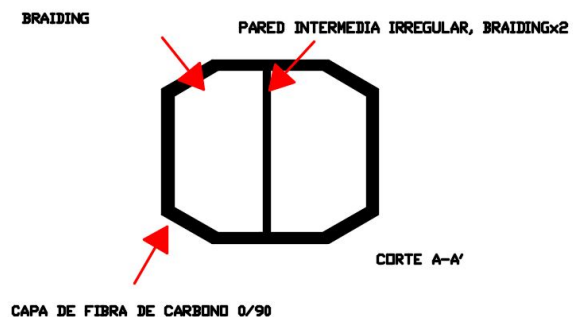


Figura 4.2: Cortes realizados para la comprensión de la caracterización geométrica

Comenzando por el mango, en la Figura 4.3 observamos como su acabado no es regular debido al proceso de fabricación. Observamos la existencia de una pared intermedia, debido a la coexistencia del inicio y el final del *Braiding*, el cuál será detallado posteriormente. Los componentes del mango serán:

- Capa de Fibra de carbono equilibrada 0/90 de espesor 0.39 milímetros.
- Braiding compuesto por fibra de vidrio y fibra de carbono con un espesor de 0.22 milímetros que será analizado posteriormente.



(a) Irregularidad en el contacto de tubos en el mango (b) Corte A-A' de detalle de geometría del mango

Figura 4.3: Caraterización de la geometría de la pala MARVEL - Mango

En la Figura 4.4, el corte realizado a la pala que correspondería con el corte E-E' de la Figura 4.2, se ha analizado la homogeneidad de estas paredes a lo largo de toda la pala. Pese a sus irregularidades, se ha considerado como un espesor constante, y debemos diferenciar de las 3 paredes que quedan "libres" (es decir, que están en contacto con el ambiente) y la pared que queda en contacto con la espuma:

- Paredes libres: Estarán compuestas por 3 capas de fibra de vidrio equilibradas a 0/90 de forma superficial, de 0.33 milímetros de espesor cada una, y una capa interior que será el *Braiding*.
- Pared en contacto con espuma: Será únicamente el *Braiding*.
- Además, se observan las 3 capas de fibra de vidrio (superiores e inferiores) en contacto con la espuma.

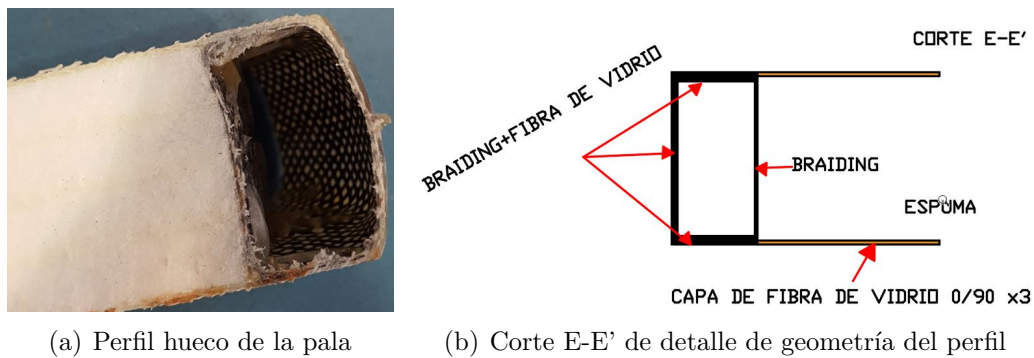


Figura 4.4: Caraterización de la geometría de la pala MARVEL - Perfil

En la Figura 4.5, se muestra la zona de golpeo de la pala compuesta por:

- Espuma EVA de 36.2 mm.
- 3 capas de fibra de vidrio equilibrado a 0/90 tanto por arriba como por abajo de la espuma.

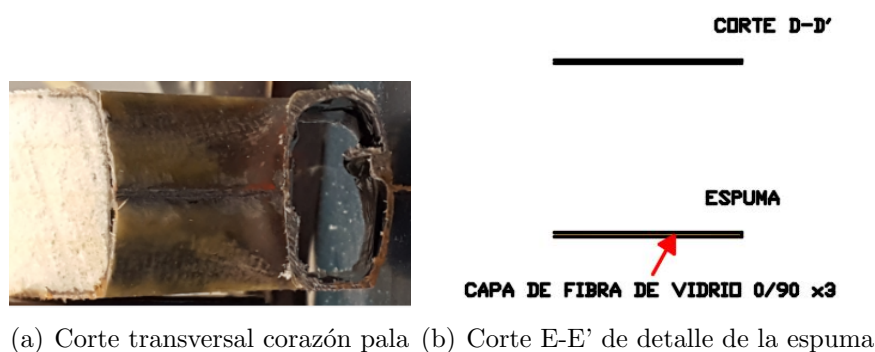


Figura 4.5: Caraterización de la geometría de la pala MARVEL - Golpeo

En la Figura 4.5 además, la composición del corazón de la pala en la zona de golpeo, algo que, hasta que no se realizó el corte, era una incógnita. En la Figura 4.6, se muestra esquematizada la geometría de dicha zona que se compone por:

- 3 capas superficiales de fibra de vidrio equilibradas a 0/90 con un espesor de 0.33 milímetros cada una.
- 1 capa de fibra de carbono equilibrado a 0/90 con un espesor de 0.39 milímetros.
- Finalmente resolvemos nuestra incógnita, observamos que en esta zona, a diferencia de los perfiles de la pala, nos encontramos con espuma y no está hueco.

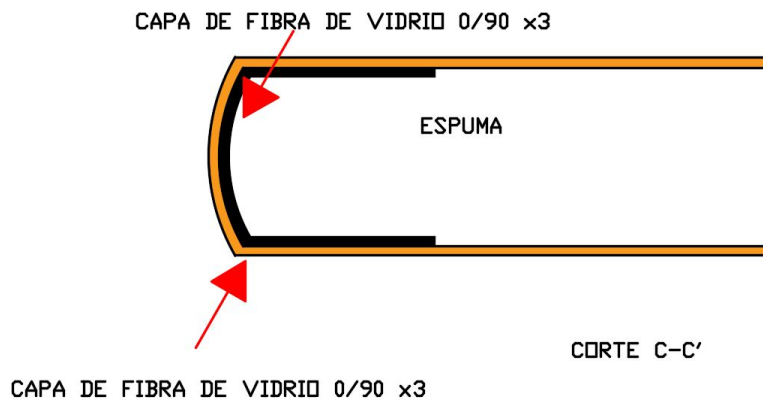


Figura 4.6: Corte C-C' de detalle de geometría del corazón

Para detallar los materiales empleados en nuestra pala de pádel, vamos a diferenciar en zonas la misma según se detalla a continuación:

- **Superficie de golpeo:** En esta zona, tendremos goma EVA de 36.2 mm , y en sus extremos, tendremos 3 capas equilibradas a 0/90 de **fibra de vidrio** de 216 g/m^2 , cuyas especificaciones se observan en el apéndice E del presente TFG, con un espesor de 0.33 mm cada una, obteniendo un espesor total de la pala de 38 mm . Para la estimación de los espesores se han realizado numerosas medidas, obteniendo resultados de hasta 0.3 milímetros de diferencia de espesor total, debido a que la resina se filtra en la espuma y crea concentraciones de la misma que falsean el espesor de la medida, ya que no será lo mismo tener 2 milímetros de fibra de vidrio que 1 milímetro de fibra de vidrio y 1 de resina, ya que esta última no aporta apenas nada mecánicamente.
- **Perfil:** A los perfiles se les otorga una mayor rigidez, en esta zona no tendremos goma EVA, se superpondrán las 3 capas de vidrio de la superficie de golpeo, con una capa de **fibra de carbono sarga 2x2 de 3K y 200 g/m² con ensimaje epoxi** tal y como se detalla en el apéndice E y otra de **fibra de vidrio**, en una relación de peso de 60-40, formando 30° y -30° aproximadamente, con la generatriz de la curva. Este ángulo es estimado, depende del proceso de fabricación, para su obtención se han realizado cortes en la pala como se ha

comentado anteriormente y se han observados variaciones de dicho ángulo, se decide usar el ángulo obtenido como promedio de 30 grados añadiendo que sería de interés como línea futura el estudio del procedimiento de inflado del *Braiding*.

- **Contacto tubo espuma:** Tendremos que el único material encontrado, será el tubo que rellena el perfil por completo, pero no encontramos una superposición con las capas de fibra de vidrio, por lo que tendremos una capa de **fibra de carbono** y otra de **fibra de vidrio** en relación de peso 60-40, formando 30° y -30° aproximadamente, con la generatriz de la curva.
- **Corazón golpeo:** En esta zona, dispondremos superficialmente 1 capa de fibra de carbono equilibrada a 0/90 como se comento anteriormente. Además, estaremos en superposición con la superficie de golpeo, por lo que debemos añadirle las 3 capas de fibra de vidrio y además como se ha observado en los cortes realizados, la presencia de la espuma.
- **Corazón puente:** En esta zona tendremos la capa de fibra de carbono detallada anteriormente en superposición con el tubo también detallado.
- **Mango:** Esta zona tiene la misma composición que la de **Corazón puente**, salvo que, entran en contacto los dos extremos del tubo, ocasionando la pared intermedia mostrada en la Figura 4.7. Esta pared intermedia es inevitable debido al proceso de fabricación, ya que en la zona del mango, siempre existirá el auto-contacto del *Braiding*.

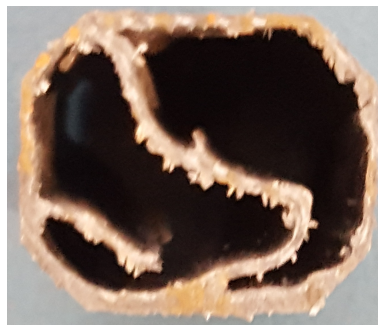


Figura 4.7: Pared intermedia ocasionada por el auto-contacto del *Braiding*

3. Proceso de fabricación [3]

En este apartado, se ilustrará el proceso de fabricación seguido actualmente. Será un punto de estudio clave ya que, como hemos observado en el apartado anterior, el proceso de fabricación influye en la incertidumbre ocasionada en los distintos espesores, así como en el ángulo que forman los componentes del *Braiding*.

3.1. Elaboración y cortes de capas

Se muestra en la Figura 4.8, se muestran capas de **fibra de carbono** (color negro) y capas de **fibra de vidrio** (color blanco).



Figura 4.8: Capas de fibra de vidrio y carbono cortadas a su forma final para diferentes palas.

En cuanto a la espuma, *Shark Pádel* la recibe ya cortada con el espesor deseado, ellos son los encargados de darle la forma de la pala deseada. Esta se compone de varias capas del mismo material unidas mediante la aplicación de calor.

3.2. Molde de silicona

Se realiza un molde en silicona del negativo de la pala, el cual será el encargado de mantener la forma de la pala. En la Figura 4.9 podemos observar los primeros pasos de fabricación sobre dicho molde.

3.3. Aplicación de resina

Aplicaremos la resina para fijar y unir las diferentes capas. En primer lugar, se aplicará a la capas de fibra de vidrio que constituyen la parte principal de la pala tal y como se muestra en la Figura 4.9.



Figura 4.9: Aplicación de resina sobre las primeras capas de fibra de vidrio.

Acto seguido, dispondremos la fibra de carbono que constituye el mango y el corazón de la pala tal y como se muestra en la Figura 4.10.



Figura 4.10: Aplicación de resina sobre las primeras capas de fibra de vidrio.

3.4. Preparación del *Braiding*

Se prepara el *Braiding*, cuya misión será comprimir la espuma y aportar rigidez a los bordes de la pala. Se muestra en la Figura 4.11, la aplicación de resina al tubo para adherirlo a la espuma y a las capas de fibra de vidrio que envuelven toda la pala.



Figura 4.11: Aplicación de resina sobre el *Braiding*.

3.5. Posicionamiento de los materiales sobre el molde

Una vez tenemos preparados todos nuestros materiales, incluimos nuestra espuma ya cortada a la forma deseada y el braiding rodeando a esta sobre las capas anteriormente hemos aplicado.

3.6. Cierre del molde

Este es uno de los pasos críticos del proceso, intentamos conseguir una pala completamente plana, sin embargo, observamos como en todas las palas de pádel dadas tenemos cierta curvatura en la cara de golpeo, debido al proceso de compresión por el llenado del tubo. Se muestra en la Figura 4.12 el proceso del cerrado del molde.



(a) Posicionamiento de la parte simétrica del molde (1).
(b) Posicionamiento de la parte simétrica del molde (2).



(c) Refuerzo contra la expansión lateral atornillado.
(d) Disposición del refuerzo superior



(e) Proceso de montaje de las barras de refuerzo.
(f) Montaje de las barras de refuerzo.

Figura 4.12: Proceso de cierre del molde de la Pala

Observamos que, pese a todos los refuerzos empleados mediante la aplicación de los pares de apriete correspondientes sobre el molde en el proceso de fabricación, no conseguimos evitar la expansión transversal de la espuma por efecto Poisson.

3.7. Llenado del perfil

Por último, debemos inyectar aire a presión en el tubo de llenado, con el fin de disponerlo adyacente a la espuma y a las capas de fibra de vidrio. Inicialmente tenemos el tubo tal y como se muestra en la Figura 4.13, debemos atar el tubo sobrante con el fin de poder lograr la presión deseada, tal y como se muestra en la Figura 4.14.

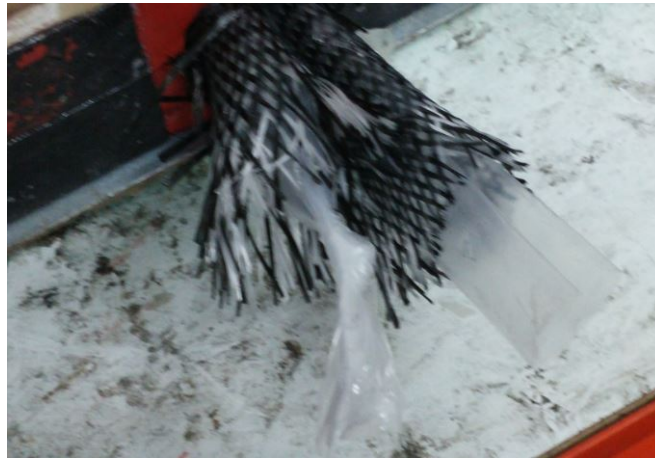


Figura 4.13: Molde cerrado donde se observa el orificio de introducción de aire.

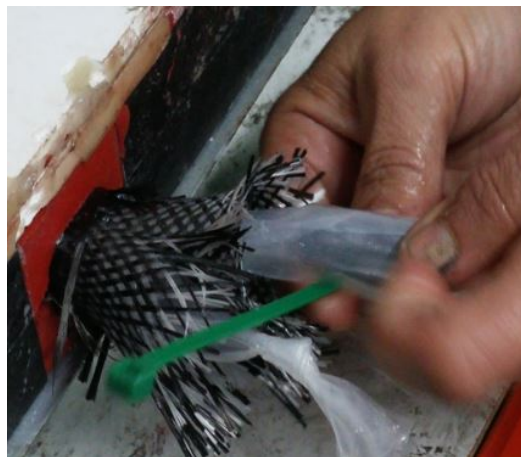


Figura 4.14: Nudo realizado en el tubo para poder ejercer la presión deseada.

Vemos como en el mango, se encuentra el tubo por duplicado, obteniéndose la irregularidad anteriormente comentada.

El plástico interior a las capas de fibra de vidrio y carbono que componen el tubo, pueden ser extraídas fácilmente, obteniéndose al fin, nuestra pala de estudio.

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. Podemos observar una pala finalizada, lista para su uso y disfrute, y la pala que se estudia en este TFG en la Figura 4.15.



(a) Pala Marvel lista para su uso (b) Pala Marvel estudiada en este TFG

Figura 4.15: Pala de pádel proporcionadas por *Shark Pádel*

Capítulo 5

Técnicas experimentales

1. Introducción

Este capítulo detalla las cadenas de medidas para los ensayos realizados. Realizaremos un ensayo cuasi-estático, que será el de la cadena de medida de desplazamientos, y un modelo dinámico que será el de la máquina de caída de dardo.

Será necesario realizar inicialmente un ensayo cuasi-estático ya que, una de las dificultades de este TFG será saber si el modelo que tenemos es válido o no, por ello, previo a introducir las no linealidades que complican el análisis del modelo dinámico, realizaremos una correlación cuasi-estática. El objetivo de esta primera correlación será saber si tanto los materiales, como la geometría modelada, se parecen a la realidad, ya que de no ser así, no sería necesario pasar al modelo dinámico porque sabríamos que no iba a dar resultados correctos.

Una vez podamos comprobar la fiabilidad del modelo, podremos pasar al ensayo dinámico, el cual tratará de simular el impacto de una bola en el centro de la pala, con el objetivo de poder caracterizar el comportamiento a impacto de la pala, así como observar lo que está sucediendo en el impacto.

1.1. Cadena de medida de desplazamientos

En este apartado, se explicará detalladamente el procedimiento que se ha tomado para la elaboración de los ensayos cuasi-estáticos.

El objetivo de este ensayo es validar el modelo numérico que se va a realizar de la pala, con el fin de minimizar los posibles errores en el modelo dinámico.

Se comenzará describiendo el utillaje empleado. Se puede observar a mayor detalle en los planos que se muestran en el apéndice H de este TFG.

1.1.1. Utillaje

En primer lugar, debemos disponer un utillaje que nos permita caracterizar la rigidez de la pala, para ello debemos definir las condiciones de contorno lo más parecidas posible a las reales. Para simular el agarre de la pala, se ha diseñado un montaje que impone condiciones de empotramiento en el mango de la misma. Para ello se han dispuesto dos placas de acero que quedan atornilladas entre sí, en cuyo interior queda embebida la pala de pádel. Debido a la facilidad con la que se puede producir el aplastamiento del mango de la pala, debido a un exceso de aplicación de par de apriete en los tornillos, se han dispuesto calzos de acero hasta 25 mm para asegurar el contacto justo entre la pala y las placas.

Por otro lado, debemos adaptar nuestro utillaje a la guía de flexión *SERVOSIS*, para ello se han utilizado como sistemas de unión tubos de aluminio de la marca Nikai de 45x45L, además de la tornillería necesaria. Conseguimos así un sistema de fijación a la guía y la posibilidad de realizar desplazamientos de nuestro empotramiento a través de los tubos, para así poder ensayar distintos puntos de aplicación de carga.

El utillaje diseñado debe cumplir con las siguientes especificaciones:

- Se debe adaptar a la guía de ensayo *SERVOSIS*.
- Debe asegurar el empotramiento en el mango de la pala.
- No deben producirse desplazamientos en el utillaje debido a holguras por el proceso de fabricación que falseen los resultados.
- No debe tener una altura total mayor de 20 centímetros para que pueda utilizarse también en la máquina de impacto *INSTRON CEAST 9350*.

Además, el utillaje debe permitir:

- Un cambio relativamente rápido entre palas para agilizar los ensayos.
- Un deslizamiento para permitir realizar ensayos en distintas posiciones del eje de simetría.
- Un cambio de posición que permita la realización de los ensayos de torsión.

Comenzaremos describiendo nuestro montaje desde la zona inferior de la Figura 5.1 hasta la zona superior.

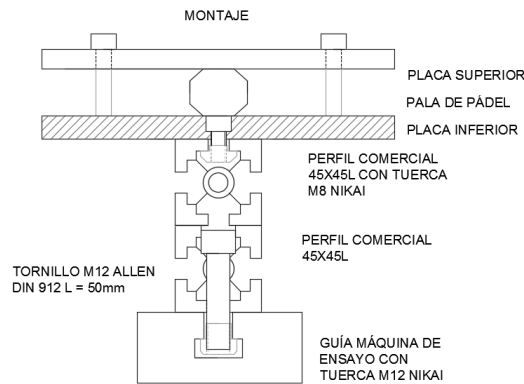


Figura 5.1: Esquema montaje del utilaje empleado para los ensayos cuasi-estáticos y dinámicos sobre la pala de pádel

1.1.2. Guía

Se trata de un utensilio normalizado, así como las tuercas que sirven para anclarnos o deslizarnos a través de la misma, por lo que, debemos adaptar nuestro utilaje a las disposiciones que exija la guía que se muestra en la Figura 5.2. Para trasladarnos de la máquina de flexión a la máquina de dardo, tendremos que sustituir la tuerca que sirve de conexión guía-máquina.



Figura 5.2: Guía de máquina de flexión y de impacto de la marca *SERVOSIS*

A esta guía irá conectado el tubo de aluminio inferior mediante 2 tuercas en T según norma DIN-508 de M12, con un par de apriete de 11 N/m.

1.1.3. Tubos de aluminio

Dispondremos dos tubos de aluminio normalizado de 45x45L de la marca Nikai. El aluminio, al tener una baja rigidez, debemos aumentar en la medida de lo posible la inercia de los tubos. Como solución optaremos por instalar dos tubos, uno situado encima del otro. De esta forma, conseguimos un aumento de la inercia y, además, ampliamos el recorrido de la guía situando el tubo inferior de forma que sobresalga de la misma, de este modo, podremos ensayar la pala en distintas posiciones.

Se muestra en la Figura 5.3, el perfil de aluminio *Nikai 45 x 45 L* usado.

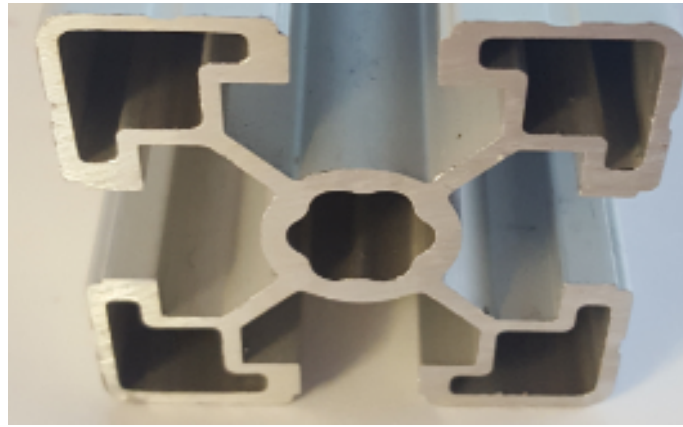


Figura 5.3: Tubos de aluminio 45x45 L usado para la fijación y traslación del empotramiento en el utillaje

El tubo inferior, tendrá dos orificios por los que pasarán tornillos de M12, los cuales se roscarán a la guía de la máquina, uniendo este tubo con la misma a través de tuercas de M12 según norma DIN-508, con un par de apriete de 11 N/m. Además, se situarán en él dos tuercas comerciales *Nikai* de M8 donde se enlazarán con el tubo superior mediante tornillos de la misma métrica. Este montaje será fijo, es decir, los tornillos de M12 permanecerán inmóviles en todo momento.

En cuanto al tubo superior, tendrá dos orificios por los que pasarán tornillos de M8, roscarán en las tuercas situadas en el tubo inferior con un par de apriete de 11 N/m. Será este montaje el que servirá para el posicionamiento del punto de aplicación de la carga a lo largo del eje de simetría de la pala ajustando su posición mediante la unión entre tubos. Además, este tubo servirá de unión con la placa inferior, mediante la situación de dos tuercas comerciales de la marca *Nikai* de M8, uniendo así, los tornillos avellanados centrales de la placa de M8 con el tubo superior con un par de apriete de 11 N/m.

1.1.4. Placa inferior

Se dispondrá una placa de acero sobre los tubos de aluminio. Esta placa tendrá la función de aportar rigidez y simular el empotramiento junto a la placa superior.

En esta placa, se han realizado un total de 8 orificios que a continuación se detallan:

- **Orificios exteriores:** Dispondremos 4 orificios roscados en las 4 esquinas de la placa. Su función será asegurar el posicionamiento de la placa superior a esta, dejando embebida nuestra pala de pádel a ensayar. Serán estos los que permanezcan en el mismo “*sistema de coordenadas*” que los orificios de la placa superior.

- **Orificios interiores:** Se dispondrán 4. Los dos situados paralelos a los lados de la placa, servirán tanto para el ensayo de flexión en la posición de golpeo denominada “*punto dulce*” como para el ensayo de flexión en el extremo. Por otro lado, tendremos dos orificios girados 30 grados respecto a la vertical, servirán para, realizando solo la modificación de estos tornillos, ser capaz de realizar el ensayo de torsión, sin necesidad de desmontar todo el equipo.

Por último en cuanto a esta placa, se dispone de un espesor 12 milímetros, debido a que los orificios centrales deben estar avellanados, para asegurar el contacto pala-placa, es decir, debe tener un espesor tal que admita la cabeza del tornillo además de asegurar la fijación.

En la Figura 5.4 se muestra la placa inferior tras el proceso de mecanizado.

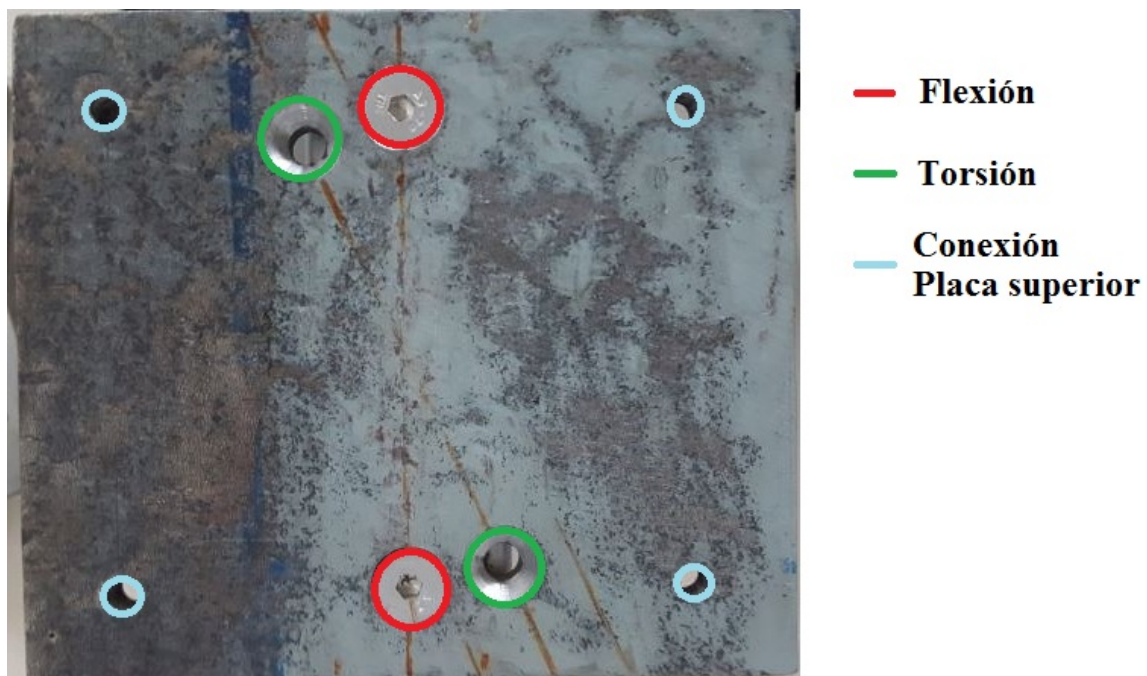


Figura 5.4: Placa inferior de sujeción del utillaje del empotramiento de la pala obtenida a partir de mecanizado

1.1.5. Calzos de acero

Una característica bastante común en este tipo de materiales compuestos es el riesgo de aplastamiento por la aplicación de la presión. Debido a las características del mango de nuestra pala, debemos asegurar el empotramiento a la vez que aseguramos no aplicar una presión excesiva. Como solución, se opta a limitar el apriete de los tornillos mediante “calzos” de acero altamente rígidos.

La altura del mango de nuestras palas, tiene un valor promedio de 25.8 mm (altura irregular que cambia de una pala a otra). Para asegurar el empotramiento, se disponen entre las placas de acero principales de sujeción, láminas de acero con

una altura total de 25 mm (láminas de gran precisión). Así, aseguraremos el empotramiento realizando un par de apriete tal que fije las placas, ya que, al fijarlas, aseguramos que en esos 0.8 mm de diferencia entre la altura de las láminas y la pala, existe contacto.

En la Figura 5.5 se muestra la disposición de las láminas empleada.



Figura 5.5: Disposición de calzos para evitar el estallamiento del mango de la pala

1.1.6. Pala de pádel

Se situará embebida entre las dos placas de acero, en una posición centrada siguiendo la directriz que se genera al unir el centro de la circunferencia generada en los orificios de unión entre la placa inferior y el tubo de aluminio superior.

1.1.7. Placa superior

Aportará la rigidez necesaria al utillaje. Se enlazará con la placa inferior mediante tornillos de M8, aplicando un par de apriete de 5 N/m, inferior al resto de los aplicados por el riesgo de aplastamiento, asegurando la fijación. Tendrá 4 orificios alineados con los 4 de las esquinas de la placa inferior. En la Figura 5.6, se muestra dicha placa.



Figura 5.6: Placa superior de sujeción del utillaje del empotramiento de la pala obtenida a partir de mecanizado

1.1.8. Resumen de tornillería y ruercas utilizado

Se utilizarán un total de 6 tornillos de M8 según norma DIN-912, 2 tornillos avellanados de M8 según norma DIN-7991, 2 tornillos de M12 según norma DIN-912, 4 tuercas en T comerciales de la marca *Nikai* de M8 y 2 tuercas en T de M12 según norma DIN-508. Se muestra en la Figura 5.7 el tipo de tornillos y tuercas usados en el utillaje.



(a) Tornillo M8 DIN 912 (b) Tornillo M8 DIN 7991 (c) Tuerca M12 Din 508

Figura 5.7: Tornillería usada en la fijación de elementos del utillaje empleado para los ensayos

Debido a la baja exigencia de carga, será suficiente con tornillos 4.6.

1.1.9. Máquina de ensayo de flexión

Se utilizará la máquina de flexión de la Universidad de Málaga, situada en el taller número 28, y se realizarán las medidas con los LVDT que se ven en la Figura 5.8, en el apéndice G, tendremos los valores de conversión y certificación de calibración, para los dos LVDT sin accionamiento de muelle tendremos un factor de 0.25 V/Kg y para el otro tendremos 0.20 V/Kg, mientras que para la fuerza, tendremos un factor de conversión de 98.1 N/V. A continuación, se detallará el procedimiento necesario para la realización del ensayo, de forma que éste sirva de guía para el siguiente investigador.

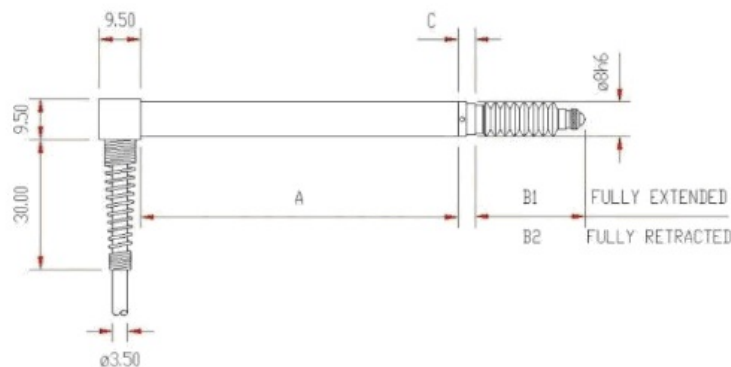


Figura 5.8: Medidores de precisión digital, LVDT

A continuación se detallan los pasos a seguir para la puesta a punto del ensayo:

1. Asegurar la conexión a la red de la maquinaria.
2. Encender la maquina, si todo va bien debe encenderse la luz blanca que se muestra en la Figura 5.9.



Figura 5.9: Luz blanca de activación de máquina de flexión

3. Encender la fuente de alimentación. La máquina no realizará ningún movimiento hasta que no estén encendidas las 3 luces de la fuente que se muestran en la Figura 5.10.



Figura 5.10: Fuente de alimentación de la máquina de flexión

4. Por supuesto, encender el ordenador, y abrir el software de la Universidad de Málaga *P2K*. Activamos la célula de 500 kg que ha sido calibrada en dos rangos: uno hasta 500 kg y otro hasta 100 kg, será este último el que usemos. Debemos asegurarnos de que los parámetros de sensibilidad y signos son los adecuados según se muestran en la Figura 5.11, en rojo se muestra la célula escogida, en verde los signos escogidos y en azul la sensibilidad.

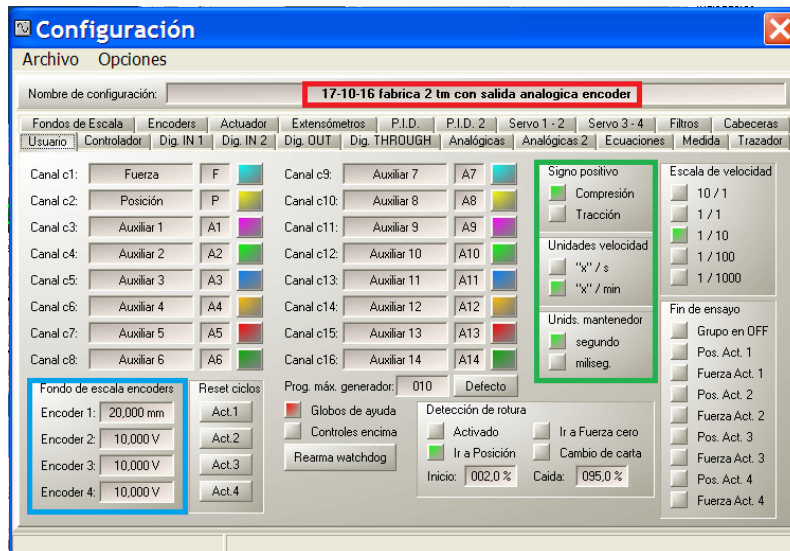


Figura 5.11: Panel de control de la célula en la máquina de flexión

5. Establecer la velocidad de descenso de la máquina, se aconseja, realizar un control por posición, ya que se tiene un mejor concepto de la deformación que soporta y no tanto de la carga. Por último especificar posición final y reiniciar el contador a 0, todos estos datos se recogen en la Figura 5.12.



Figura 5.12: Pantalla de control de posicionamiento y velocidad de la máquina de flexión

6. Posicionar manualmente la maquinaria con el panel de control que se muestra en la Figura 5.13, y fijar la posición como el origen.



Figura 5.13: Panel de control manual de movimiento de la máquina de flexión

7. Una vez tenemos la máquina lista, pasamos a la mesa de medida de los LVDT (medidores electrónicos de alta precisión). Debe estar conectada a la red y, la fuente de alimentación de los LVDT, debe estar conectada previamente a arrancar el software de medición *NI SignalExpress*. Se aconseja realizar una prueba de medición previa a la realización del ensayo.
8. Por último, activamos la máquina de la forma que se indica en la Figura 5.14, se pone en marcha la medición de forma simultánea, tanto de los LVDT como de la maquina, para poder comparar resultados y finalmente realizamos el ensayo.

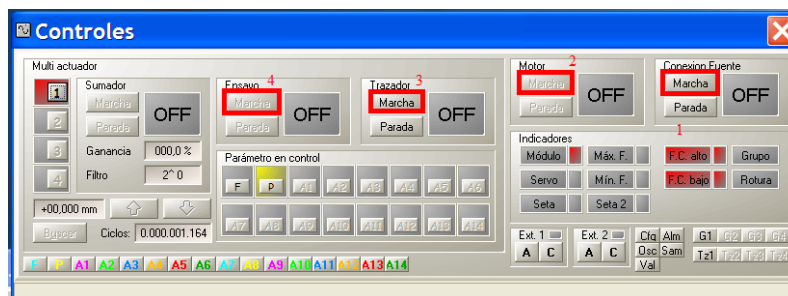


Figura 5.14: Puesta en Marcha del motor para el ensayo de flexión

Una vez definimos la puesta a punto del ensayo, se realizarán los siguientes ensayos, que serán detallados en su correspondiente apartado:

1. Flexión aplicando la carga en el punto dulce de la pala
2. Flexión aplicando la carga en el extremo de la pala
3. Torsión

1.1.10. Adquisición de datos

Previa a toda medición, debemos conectar los LVDT al sistema de adquisición de datos, se muestra en la Figura 5.15, la conexión realizada de los LVDT. Como se ha comentado, tendremos dos tipos de LVDT, uno de ellos es un accesorio perteneciente a la máquina de ensayo de flexión que se conecta directamente a ella y no necesitará alimentación (canal 3 de la Figura 5.15, tiene un recorrido de 4 mm con una precisión de $1 \mu m$ y un 1% de linealidad), mientras que los dos LVDT externos (canales 1 y 2 de la Figura 5.15, con un rango de medición de $\pm 2,5 mm$, una precisión de $2.5 \mu m$ y una sensibilidad de $80 \pm 4 mV/(V \cdot mm)$), son de la marca *Solartron Metrology modelo AXR/2.5/S* de cable de salida radial, que se alimentaran con la fuente de *LEXITRON* de la serie *FA*. Debido a que los dos LVDT externos necesitan alimentación, se realiza el conexionado tipo regleta de la Figura 5.15.

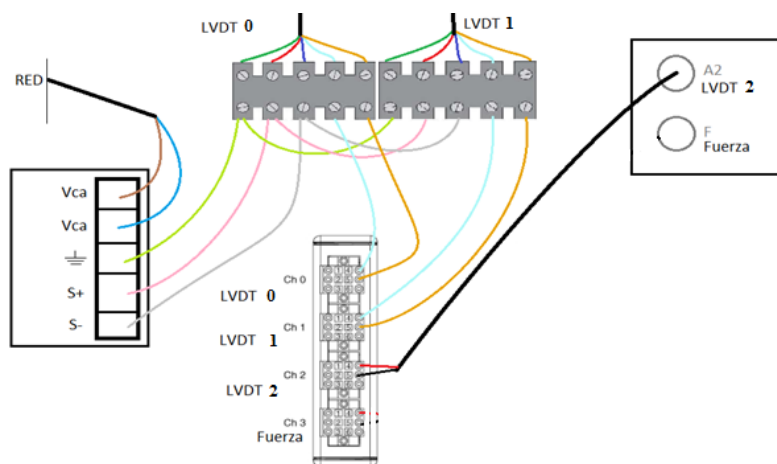


Figura 5.15: Esquema de conexión del cableado necesario para la medición de los LVDT externos de *Solartron Metrology*

Tendremos simultáneamente midiendo tanto la máquina de flexión como los LVDT. La máquina irá conectado a un ordenador que la controla mediante el programa *P2K*, cuyas opciones se han comentado anteriormente. Los LVDT, estarán conectados a otro ordenador que recibirá las medidas mediante el programa *NI SignalExpress*. Para poder realizar la superposición de las mediciones de los LVDT y la máquina, debemos lanzar a la vez las mediciones (con cierto error ya que se realiza manualmente). En la Figura 5.16, mostramos los dos softwares en funcionamiento simultáneo en la realización de uno de los ensayos.



Figura 5.16: Adquisición de datos simultánea de los LVDT con el y la máquina de ensayo mediante los softwares P2K y NI SignalExpress

2. Máquina de caída de dardo

2.1. Utillaje

El utillaje empleado para la sujeción en este ensayo será el mismo que se expone en el anterior apartado.

2.2. Máquina de ensayo de impacto

Utilizaremos la máquina de impacto *CEAST 9350* de la empresa *INSTRON*, la cual es capaz de dar un impacto desde 0.59 J hasta 757 J de energía, se muestra en la Figura 5.17. Emplearemos como célula de medición un captador extensométrico de 22 KN.

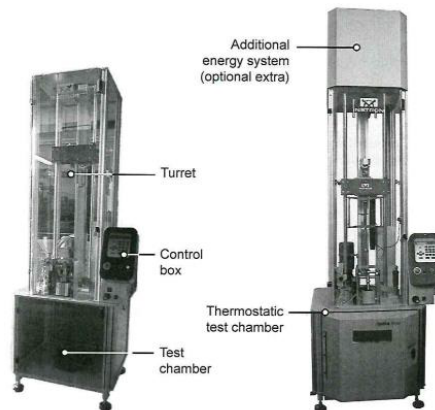


Figura 5.17: Máquina de ensayo de impacto modelo CEAST 9350 de la empresa INSTRON

A continuación detallaremos el procedimiento seguido para la realización de los ensayos, pero en primer lugar, debemos resaltar que debemos desactivar el “*holder*” de nuestra máquina. Debido a que hemos fabricado nuestro propio utillaje, es con este con el que debemos realizar la sujeción, ya que el *holder* es un anillo que sujeta el objeto de ensayo, para ver un ejemplo de uso con este utensilio, acudir al TFG de Sergio Caballero Encinas.

2.2.1. Puesta a punto del ensayo de impacto

- **Utillaje:** Tal y como teníamos en nuestro ensayo estático, concretamente, en el caso de fuerza centrada, desplazaremos este mismo montaje a la máquina de impacto, ya que ambas siguen teniendo el mismo punto de impacto, el punto 0 de la guía. Para posteriores investigadores, cabe destacar que será necesario la ayuda de una segunda persona debido al peso y dificultad del traspaso de una máquina a otra.

- **Posicionamiento:** Una vez tenemos nuestra pala situada sobre el utillaje, debemos fijar la posición (en altura) tal y como se muestra en la Figura 5.18, observamos como a la derecha de la figura, tenemos una tuerca y una contratuerca que servirán para el posicionamiento en altura (tuerca) y la fijación del montaje (contratuerca).

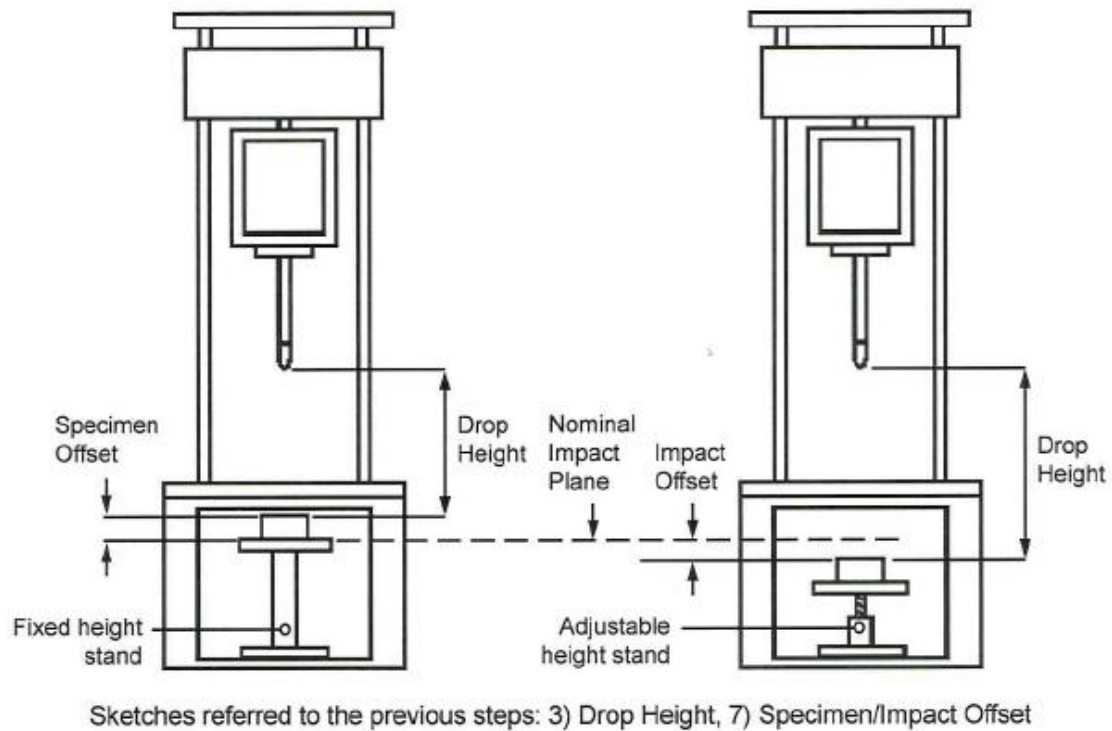


Figura 5.18: Fijación de posición de nuestro objeto de ensayo en Ceast 9350

- **Origen máquina:** Una vez tenemos fijada nuestra pala, debemos posicionar el 0 máquina o punto de referencia de la misma. Para ello, bajaremos la máquina y/o subiremos el utillaje hasta que justo se produzca el contacto impactador-pala. Será aquí donde se producirá el contacto y por lo tanto el inicio de la toma de datos.

- **Ajuste de sensor óptico:** Este modelo *Ceast 9350*, contiene un antirrebote, el cual se encarga de sujetar el impactador una vez se produce el primer impacto, con el fin de no producirse un segundo que falsease los resultados. Para ello es necesario tener bien situado el sensor óptico que se encarga de activar el antirrebote. Para ello, el software de medida calculará automáticamente la posición adecuada del sensor, el cual deberemos situar manualmente. Otra función que realiza este sensor es el cálculo del valor de la velocidad del impacto, para calcular la energía del mismo con el dato de la masa del impactador. Se muestra en la Figura 5.19, el sensor óptico del que dispone nuestra máquina.

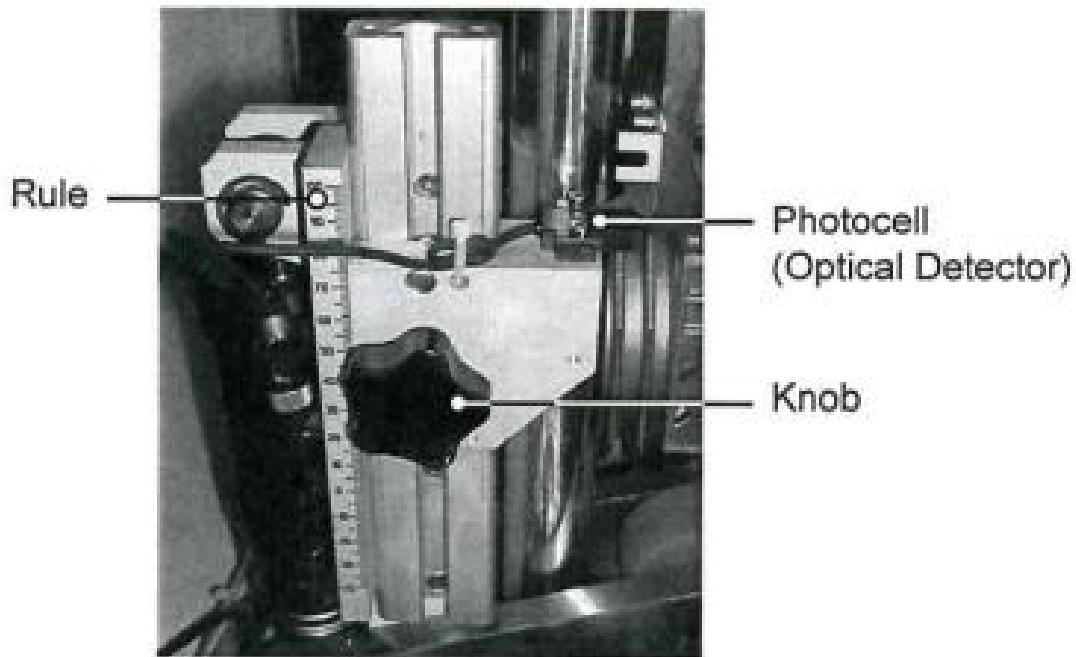


Figura 5.19: Sensor de la máquina de impacto Ceast 9350

2.2.2. Adquisición de datos

En este apartado, debemos diferenciar entre los los resultados medidos y los resultados calculados que nos proporciona *CeasView*. Como medición directa tendremos la fuerza del impacto. Mediante el captador extensométrico de la célula de 22 KN, obtiene valores en V y los traduce a N según la ecuación (5.1).

$$V_{sensor} = FS_{sensor} \cdot \frac{V}{FS_{ADconverter}} \quad (5.1)$$

Donde:

- V_{sensor} : Valor de voltaje que llega desde el dispositivo.
- FS_{sensor} : Escala completa del sensor (160 mV).
- V : Tensión recogida en la tabla *Step Data*.
- $FS_{ADconverter}$: Factor de conversión V-N = 2.5 V.

Una vez se ha medido la fuerza del impacto, los demás resultados se obtienen mediante la integración de la fuerza:

- **Velocidad:** La velocidad resultante se adquiere mediante la integración simple de la curva de la fuerza tal y como se muestra en la Figura (5.2).

$$v_i = \int_i \frac{F(t) - g \cdot M_{impactador}}{M_{impactador}} dt \quad (5.2)$$

Donde:

- v_i : Velocidad en cada punto de integración i.
- $F(t)$: Fuerza medida con el sistema de adquisición de datos.
- g : Aceleración de la gravedad.
- $M_{impactador}$: Masa total del impactador.
- t : Tiempo.

- **Desplazamientos:** Se obtienen a partir de la doble integración de la curva de la fuerza según la ecuación (5.3).

$$U_i = \int \int_i \frac{F(t) - g \cdot M_{impactador}}{M_{impactador}} d^2t \quad (5.3)$$

Donde U_i es el valor de desplazamiento calculado en cada punto de integración i.

- **Energía:** Este cálculo lo podemos dividir en dos, el que consideramos exacto y el que se obtiene mediante integración:

Exacto: Con el sensor óptimo, medimos la velocidad con la que se realiza el impacto. Teniendo la masa, calculamos la energía cinética como la ecuación (5.4).

$$E_{\text{impacto}} = \frac{1}{2} \cdot M_{\text{impactador}} \cdot V_{\text{impactador}}^2 \quad (5.4)$$

Donde E_{impacto} es la energía cinética que se transmite en el impacto y V_{impacto} es la velocidad con la que se produce. Debido a que tenemos una gran precisión de medida de la velocidad y, la masa es un dato conocido introducido por el usuario, consideramos que este es el valor exacto de la energía del impacto (este valor será el que la máquina muestra previo a la realización del impacto).

Obtenida por integración: Se obtiene mediante la integración simple de la fuerza medida según la ecuación (5.5).

$$E_i = \int_i F(\varepsilon) d\varepsilon \quad (5.5)$$

Donde:

E_i : Energía absorbida en el punto de integración i .

$F(\varepsilon)$: Curva de la fuerza en función de la deformación.

ε : Deformación producida en el captador extensométrico.

Como dato, indicar que el software realiza rápidamente estos cálculos mediante la discretización de las integraciones, vemos en la ecuación (5.6), un ejemplo de discretización en el cálculo de la energía.

$$E_i = \sum_{i=0}^{i-1} E_i + t_{\text{muestreo}} \cdot \frac{F_i \cdot v_i + F_{i-1} \cdot v_{i-1}}{2} \quad (5.6)$$

Observamos una vez se expone el método de adquisición de datos, como un error de medida en la fuerza, conlleva sucesivos errores en las posteriores medidas. Debemos tener esto presente para los siguientes capítulos, ya que, esta máquina ha sido calibrada entre el rango del 10 % y el 100 %, mientras que nosotros trabajaremos cercanos al 1.5 % de su capacidad.

Capítulo 6

Introducción a los materiales compuestos

1. Introducción a los materiales compuestos [14]

Se denomina material compuesto, a aquellos materiales que se forman por la unión de dos o más materiales para conseguir la combinación de propiedades que no es posible obtener en los materiales originales, podemos encontrar los refuerzos como partículas o fibras. Los compuestos resultantes presentan una gran heterogeneidad y anisotropía.

2. Fibra y Matriz

La fibra consiste en miles de filamentos con un diámetro entre 5 y 15 μm , permitiendo que sean fabricados mediante máquinas textiles. Tendremos dos tipos generales de fibras:

- **Fibra corta:** Con una longitud de pocos centímetros o incluso fracciones de milímetros usados en el moldeo por inyección.
- **Fibra larga:** Son cortadas durante el proceso de fabricación del compuesto, presentadas como hilos o también como tejidos.

Los principales materiales empleados como fibra son el vidrio, Kevlar (muy ligero), carbono (alta rigidez), boro (alta rigidez) y carburo de silicio (alta resistencia a la temperatura).

Tendremos 3 modos de disposición de la fibra en el plano:

- **Unidireccional:** Fibras en una sola dirección, muy rígidos y resistentes en dicha dirección pero muy débiles en su perpendicular.
- **Bidireccional:** Fibras en dos direcciones en forma de tejido.
- **Tridireccional:** Tejidos en los que la fibra se presentan en más de 2 direcciones.

3. Clasificación de los materiales compuestos

Dada la variedad existentes de materiales compuestos, resulta complejo realizar una clasificación general. Por ello, antes de comenzar a clasificar, debemos preguntarnos en función de qué factor vamos a realizar la clasificación.

Dado que la mayoría de los materiales compuestos han sido fabricados 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.

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.

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 6.1.

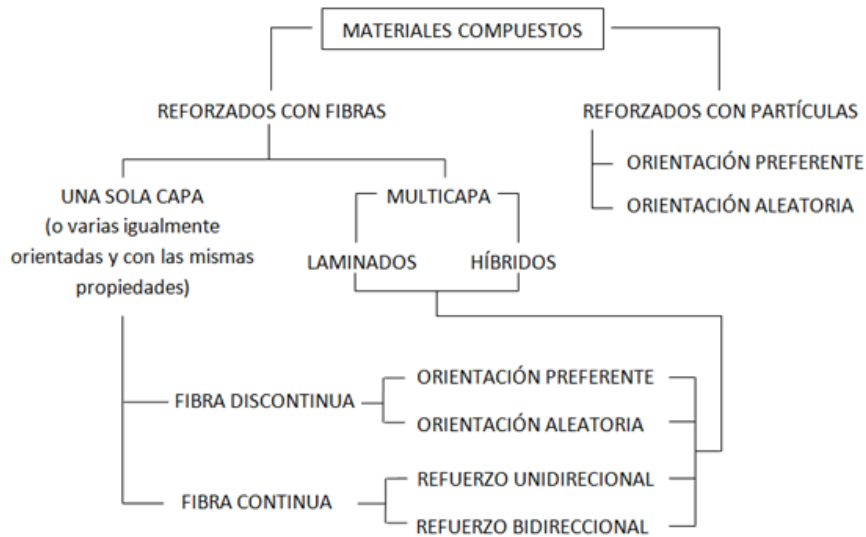


Figura 6.1: Clasificación de los materiales compuestos

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.

4. Materiales laminados

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 [19]:

- 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 $[90_3, 0_2]_S$.

Se realiza este apartado, debido a la importancia que tiene en nuestro objeto de estudio. Toda la piel que envuelve a la pala, se realiza mediante laminado. En la Figura 6.2, se muestra un esquema de la composición de un laminado.

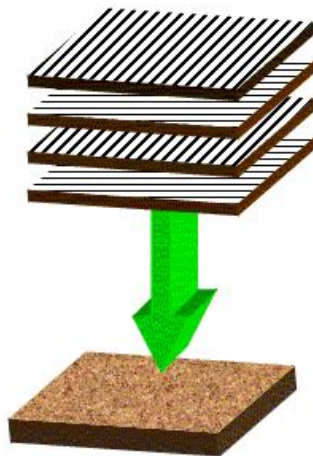


Figura 6.2: Esquema de composición de un compuesto laminado

5. Formas de elaboración de los tejidos

- Tafetán
- Esterilla
- Semiesterilla
- Sarga
- Raso
- Satén de espiguilla

En la Figura 6.3 se muestran las diferentes elaboraciones de tejidos comentadas.

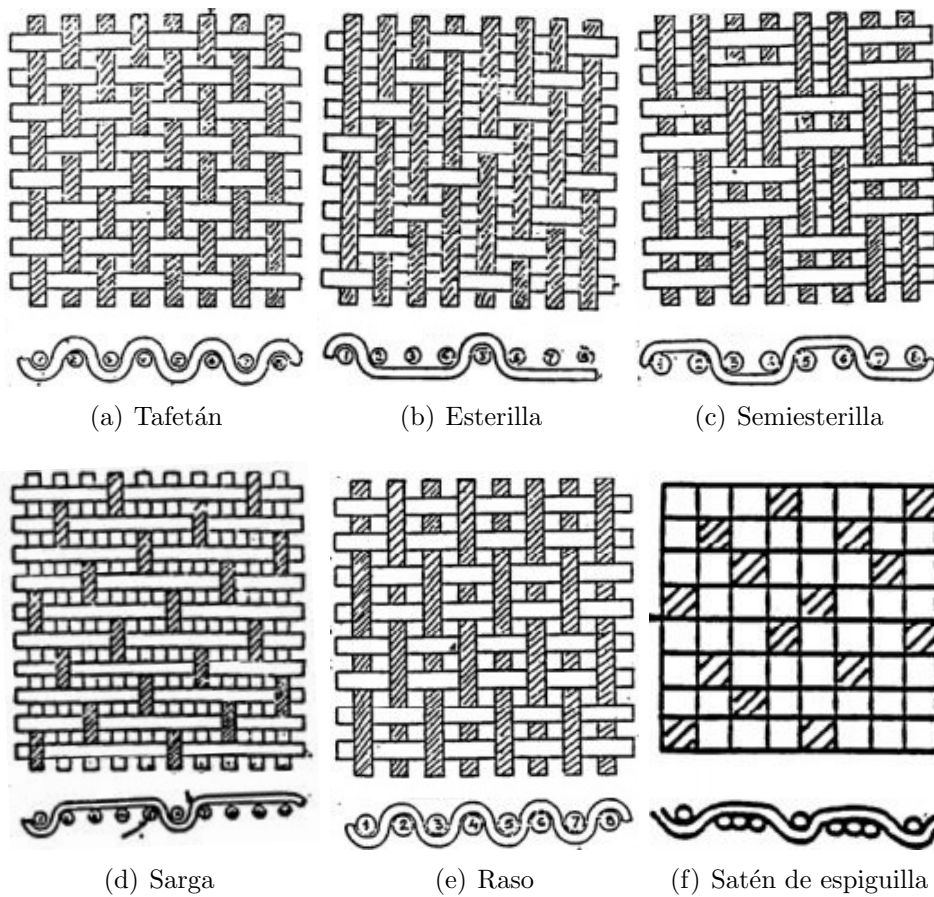


Figura 6.3: Diferentes formas de elaboración de tejidos de materiales compuestos [19]

En nuestra pala de estudio, deberemos tener en cuenta este factor para la estimación de propiedades. Podemos considerar que el tejido consta de fibras unidireccionales cruzadas a 90° , así, podemos estimar el espesor y las propiedades mecánicas según las ecuaciones (6.1), (6.2) (6.3), (6.4), (6.5) y (6.6).

$$e_1 = e \cdot \frac{n_1}{n_1 + n_2} = k \cdot e \quad (6.1)$$

$$e_2 = e \cdot \frac{n_2}{n_1 + n_2} = (1 - k) \cdot e \quad (6.2)$$

$$E_x \approx k \cdot E_1 + (1 - k) \cdot E_2 \quad (6.3)$$

$$E_y \approx (1 - k) \cdot E_1 + k \cdot E_2 \quad (6.4)$$

$$G_{xy} = G_{12} \quad (6.5)$$

$$\nu_{xy} = \frac{\nu_1 2}{k + (1 - k) \cdot \frac{E_1}{E_2}} \quad (6.6)$$

Donde:

- **e:** Espesor total de la capa.
- **n:** Número de fibras por metro (son las que varían su directriz y caracterizan la forma del tejido).
- **Subíndice 1:** Perteneciente a la fibra deformada (son las que varían su directriz y caracterizan la forma del tejido).
- **Subíndice 2:** Perteneciente a la fibra sin deformar.
- **k:** $\frac{n_1}{n_1 + n_2}$

6. Estructuras tipo *Sándwich*

Este tipo de estructura tiene gran importancia en la ingeniería. Se realizan pegando dos láminas de alta resistencia, denominadas pieles (si nos centramos en nuestra pala de pádel, nuestras pieles están en las caras externas formadas por un laminado), y una masa gruesa de material ligero en el centro, denominada núcleo (en nuestro caso, la espuma), de bajas características mecánicas. Se muestra en la Figura 6.4, esquematizado lo que podría ser el corte transversal de una estructura tipo *Sandwich*.

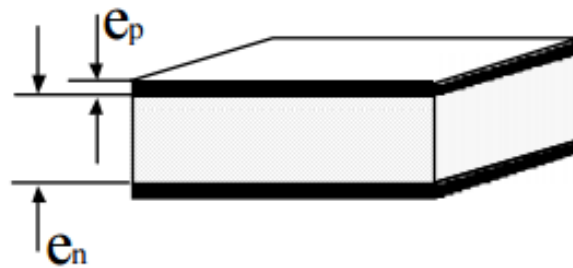


Figura 6.4: Esquemática de una estructura tipo *Sándwich*

Las características principales de este tipo de compuestos son:

- **Ligereza:** Por ejemplo, la cúpula de San Pedro [11], realizada a base de piedra, tiene una densidad de 2600 kg/m^2 , si la replicásemos en la actualidad con pieles de acero y núcleo de poliuretano, la densidad resultante sería de 33 kg/m^2 .
- **Rigidez a flexión:** Se conseguirán mayores valores debido a la aplicación del teorema de *Steiner*. Así, veamos un ejemplo del aumento de la rigidez en función del tipo de estructura que se muestra en la Figura 6.5.



Figura 6.5: Ejemplo de aumento de la rigidez de una estructura tipo *Sandwich*

Realizando los cálculos convenientes, llegamos a los resultados que se muestran en la Tabla 6.1, observándose una gran mejora de las características, sacrificando mínimamente el peso de la estructura.

Tabla 6.1: Resultados del ejemplo de aumento de rigidez

Espesor núcleo	0	t	3t
Rigidez a flexión	1	7	37
Resistencia	1	3.5	9.25
Peso	1	1.03	1.06

- **Aislamiento térmico:** Si tomamos como ejemplo el de la Figura 6.5, observamos que cuando disponemos las placas metálicas sin núcleo, la potencia calorífica transmitida sería de 1 MW, mientras que serían 300 W para la estructura *Sandwich*.

Sin embargo, además tenemos que tener en cuenta los inconvenientes de este tipo de composición:

- Las estructuras tipo *sandwich* no son amortiguadoras (malas propiedades acústicas).
- Debido a los núcleos generalmente usados, tienen una baja resistencia al fuego.
- El riesgo de la presencia de pandeo es mayor que en las estructuras clásicas.

7. Isotropía y anisotropía

Primeramente, vamos a ver gráficamente la diferencia entre un material isótropo y uno anisótropo cuando le aplicamos las mismas condiciones de carga. En la Figura 6.6, vemos el comportamiento en cuanto a deformación de ambos tipos de materiales.

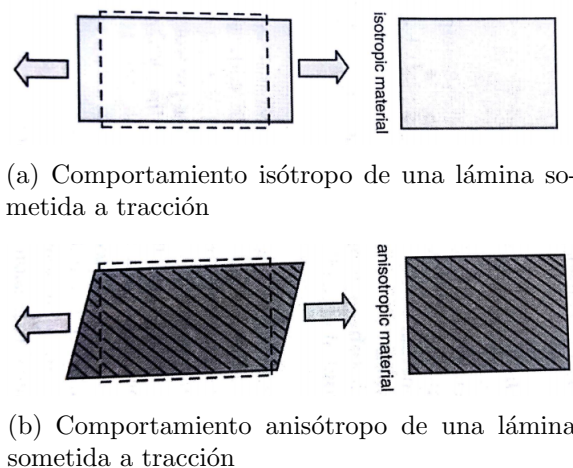


Figura 6.6: Diferencia entre comportamiento isótropo y anisótropo 2 [14]

Observamos en la Figura 6.6, las líneas oblicuas que simbolizan la dirección del laminado longitudinal, la cual no se corresponde con la dirección de la aplicación de cargas, creando así una distorsión angular añadido a la extensión longitudinal y contracción transversal que posee el material isótropo. En la Figura 6.7, se muestra la variación del módulo de elasticidad en función del ángulo de aplicación.

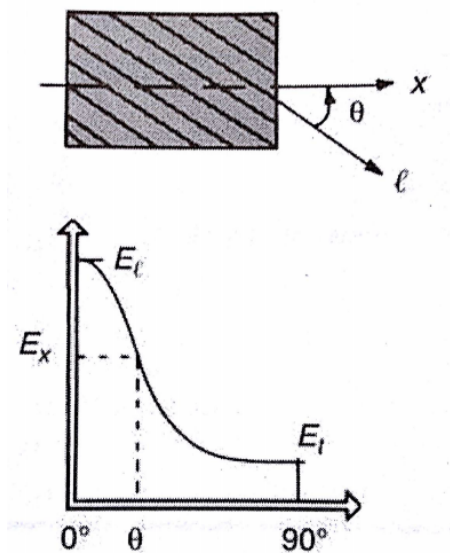


Figura 6.7: Variación del módulo de elasticidad en función del desfase carga-orientación de fibra

7.1. Materiales isótropos

Las relaciones que a continuación se exponen son válidas para un material elástico e isótropo. En la Figura 6.8 se muestran los ejes tomados para las formulaciones obtenidas.

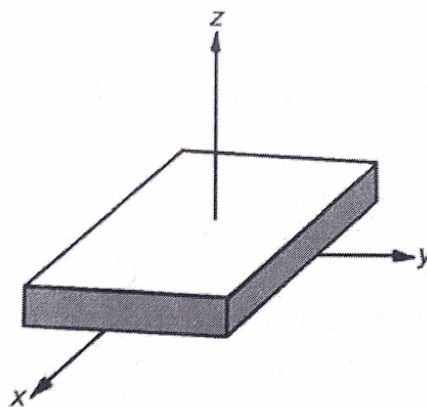


Figura 6.8: Ejes tomados para la formulación [14]

Comencemos con la relación entre tensión y deformación en 3 dimensiones, tal y como se muestra en la ecuación (6.7).

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E & -\nu/E & 0 \\ -\nu/E & 1/E & 0 \\ 0 & 0 & 1/G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (6.7)$$

En un material isótropo, tendremos tres constantes elásticas: E (Módulo de elasticidad), ν (coeficiente de Poisson) y G (Módulo de cizalladura), relacionadas según la ecuación (6.8), quedando por tanto solo 2 constantes independientes.

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (6.8)$$

7.2. Materiales anisótropos

Exponemos la relación entre deformación y tensión en un material anisótropo en la ecuación (6.9).

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_x & -\nu_{yx}/E_y & 0 \\ -\nu_{xy}/E_x & 1/E_y & 0 \\ 0 & 0 & 1/G_{xy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (6.9)$$

Observamos que la matriz sigue conservando la simetría, pero tendremos 5 constantes elásticas:

- Dos módulos de elasticidad: E_x y E_y .
- Dos coeficientes de Poisson: ν_{xy} y ν_{yx} .
- Un módulo de cizalladura: G_{xy} .

Al igual que en el material isótropo, tendremos una relación que nos reduce el número de constantes independientes a 4, según la ecuación (6.10).

$$\nu_{xy} = \nu_{yx} \cdot \frac{E_x}{E_y} \quad (6.10)$$

8. Estimación de propiedades

Para obtener las propiedades de un compuesto, inicialmente debemos conocer las proporciones de cada material, así, se define en las ecuaciones (6.11) y (6.12), como se obtienen las proporciones. Este tipo de análisis ha sido empleado para obtener las propiedades del tubo de llenado, ya que no teníamos referencia de las propiedades del mismo.

$$M_f = \frac{Masade\ fibra}{Masatotal} \quad (6.11)$$

$$V_f = \frac{Volumende\ fibra}{Volumentotal} \quad (6.12)$$

Así, sabiendo en que proporción se presenta cada elemento, podemos estimar las propiedades mediante la micromecánica que se comentará posteriormente.

En función del procedimiento de moldeo, tendremos diferentes fracciones de fibra, debido a la homogeneidad que presente cada uno de estos procesos, a modo resumen, se muestra en la Tabla 6.2 los valores usuales de distintos procesos de moldeo.

Tabla 6.2: Fracción de volumen de fibra común en función del proceso de moldeo

Proceso de moldeo	Fracción de volumen de fibra
Moldeo por contacto	30 %
Moldeo por compresión	40 %
Proyección de filamentos	60 %-85 %
Moldeo por vacío	50 %80 %

Sabiendo que la fracción de masa (o de volumen) matriz sería restarle a la unidad la fracción de fibra, podemos obtener por ejemplo la densidad del compuesto según la ecuación (6.13).

$$\rho = \rho_f \cdot V_f + \rho_m \cdot V_m \quad (6.13)$$

8.1. Micromecánica de los materiales compuestos

La micromecánica de los materiales compuestos realiza un estudio de la interacción entre los constituyentes que lo forman para obtener las características del conjunto. El objetivo es conseguir las propiedades elásticas y de resistencia de una lámina en función de las propiedades de los constituyentes (matriz y refuerzos).

Para ello se basa en una serie de hipótesis aplicadas a la lámina, a las fibras y a la matriz que pueden enumerarse como sigue:

- El material compuesto resultante que configura la lámina se considera, a nivel macroscópico, homogéneo con un comportamiento ortótropo elástico lineal hasta rotura y libre de tensiones residuales generadas por el proceso de curado.
- El material de las fibras se considera homogéneo, isótropo y con un comportamiento elástico lineal hasta rotura. Las fibras se supondrán regularmente espaciadas dentro de la matriz y perfectamente alineadas.
- El material de la matriz se supone homogéneo, isótropo y también presenta un comportamiento elástico lineal hasta rotura. Se supone que la matriz rodea a todas las fibras y que existe una adherencia perfecta en la interfase fibra-matriz.

Previo a ningún calculo, se expondrá la notación seguida. Los ejes 1 y 2, serán los ejes en los cuales definimos las cargas actuantes, mientras que los ejes que componen el material serán x e y.

Por otro lado, para no arrastrar la notación xy o 12, para la cizalladura, se utiliza la notación completa según la ecuación (6.14)

$$T_{ij} = \sigma_{ij} = \sigma_{ij}(9 - (i + j)) \quad (6.14)$$

Queda 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 [14].

Se va a calcular el módulo de elasticidad, en las direcciones 1 y 2, de una lámina unidireccional con una carga aplicada en la dirección de las fibras (1) y suponiendo que la deformación longitudinal en la dirección de la carga es la misma para la matriz y para las fibras, en la Figura 6.9, se muestra esquematizado.

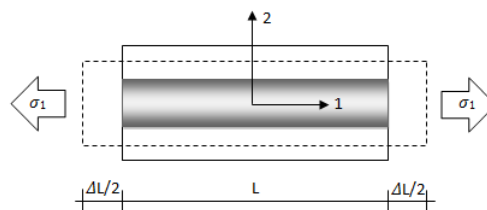


Figura 6.9: Esquematización del ensayo de tracción para la obtención de propiedades.

Suponiendo conocidas las propiedades de las fibras (E_f y V_f) y de la matriz (E_m y V_m) siguiendo las ecuaciones (6.15) y (6.16) se obtiene la expresión (6.17), que aproxima con cierta exactitud el módulo de elasticidad del material compuesto unidireccional en la dirección de la fibra.

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_m}{E_m} \quad (6.15)$$

Teniendo en cuenta del equilibrio de fuerzas externas y tensiones que:

$$\sigma_1 \cdot A = \sigma_f \cdot A_f + \sigma_m \cdot A_m \quad (6.16)$$

donde A es la sección del conjunto, se obtiene la siguiente ecuación conocida como regla de mezclas:

$$E_1 = E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m \quad (6.17)$$

Con un procedimiento análogo puede obtenerse el módulo de elasticidad en la dirección transversal a las fibras llegando a la ecuación (6.18):

$$E_2 = E_m \cdot \frac{1}{(1 - V_f) + E_m/E_{ft} \cdot V_f} \quad (6.18)$$

Extrapolando los resultados se llega a dos modelos distintos: uno suponiendo isodeformación (6.19) y otro suponiendo isotensión (6.20).

$$P_C = P_f \cdot V_f + (1 - V_f) \cdot P_m \quad (6.19)$$

$$P_C = P_m \cdot \frac{1}{(1 - V_f) + P_m/P_{ft} \cdot V_f} \quad (6.20)$$

Donde P_C es la propiedad de la lámina de material compuesto que se pretende aproximar.

En la Figura 6.10 puede observarse la diferencia que existe entre ambos modelos, siendo uno más idóneo para unas determinadas propiedades del material y otro para otras. Así, el modelo de isodeformación se usa para obtener la densidad del compuesto, el módulo de elasticidad en la dirección de fibras o el coeficiente de Poisson y el modelo de isotensión se usa para la obtención del módulo de elasticidad transversal. Eso sí, ambos modelos marcan los límites entre los que la propiedad va a moverse, habiendo grandes diferencias a medida que aumenta el porcentaje de fibras en el compuesto.

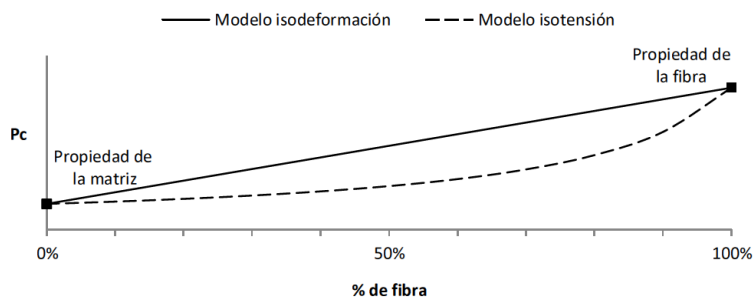


Figura 6.10: Aproximación del modelo de isotensión e isodeformación

8.2. 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. Hay que aclarar que la obtención de las propiedades de esta forma es una estimación por lo que es aconsejable siempre realizar ensayos para obtener una caracterización real del material que tenga en cuenta los múltiples aspectos que pueden afectar a sus propiedades, como por ejemplo la manera de proceder en su fabricación.

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 Patran-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 como se ha comentado. Es aquí donde aparece la necesidad de realizar una estimación de estas propiedades en esa dirección.

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, tal y como se muestra en la Figura 6.11.

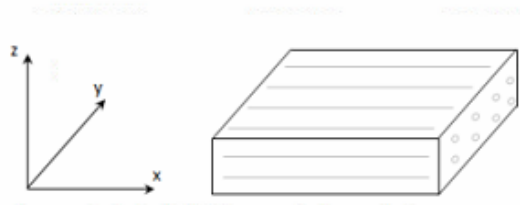


Figura 6.11: Esquema de un material compuesto unidireccional

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 6.12 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.

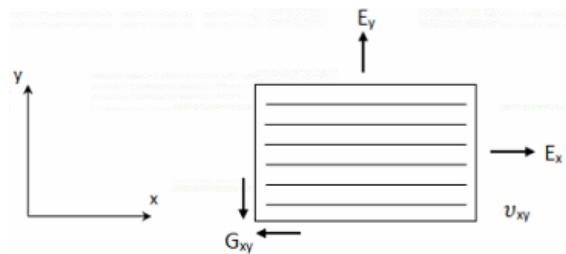


Figura 6.12: Esquema propiedades material unidireccional

Para el plano XZ, el esquema es el que se muestra en la Figura 6.13. Puede observarse que físicamente es el mismo esquema que se tiene para el plano XY (Figura 6.12) 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} .

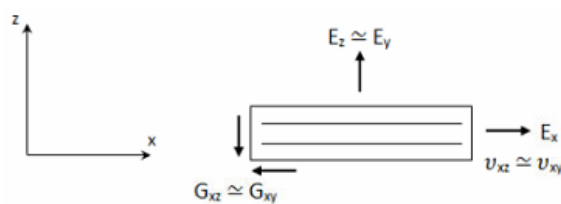


Figura 6.13: Esquema plano XZ propiedades

En este punto quedarían por definir G_{yz} y ν_{yz} . Observando la Figura 6.14, 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.

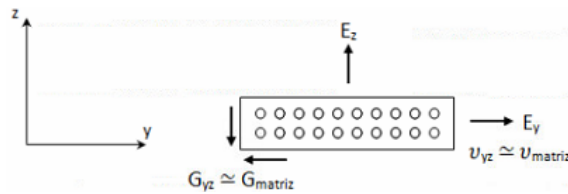


Figura 6.14: Último esquema de propiedades, plano YZ

Estimación de propiedades para un laminado 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 6.15.

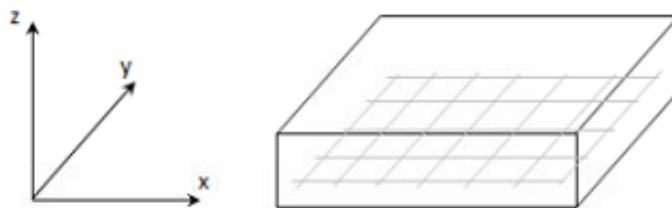


Figura 6.15: Material laminado con refuerzo

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} y ν_{xy} , como se muestra en el esquema de la Figura 6.16 con refuerzo de tejido.

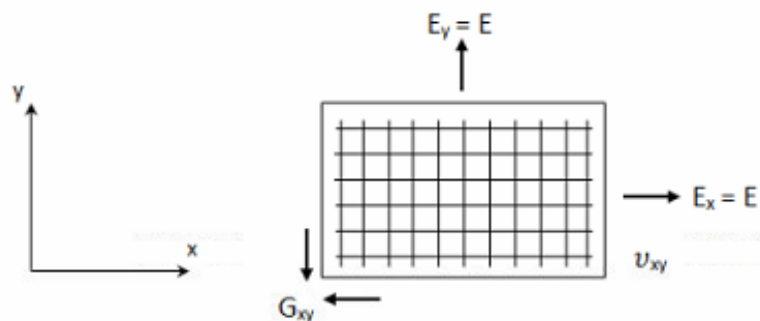


Figura 6.16: Esquema con refuerzo de tejido en el plano XY

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 6.17. En estos casos, se puede considerar el modulo de elasticidad en la dirección del espesor (E_z) similar al de la matriz del material compuesto. En cuanto al modulo transversal de elasticidad (G) se observa que $G_{xz} = G_{yz}$. Éste puede obtenerse por medio de la 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.

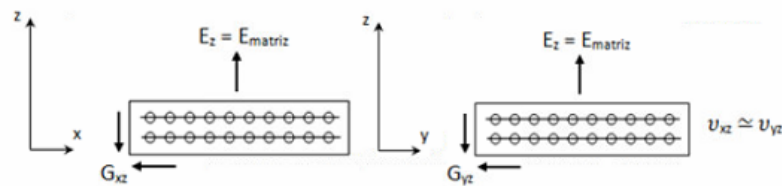


Figura 6.17: Esquema refuerzo tejido planos XZ y YZ

9. Espuma

La composición de las espumas suele estar definida por dos fases, la matriz sólida y la fase gaseosa que se encuentra dispersa por la matriz, se muestra un esquema de composición en la Figura 6.18.

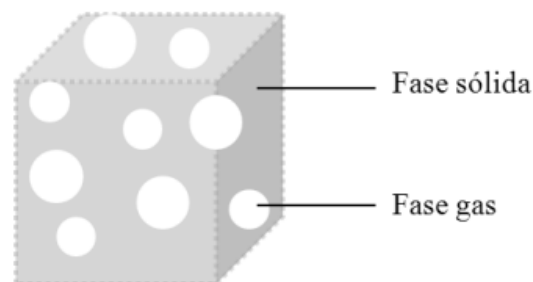


Figura 6.18: Composición genérica de una espuma

Las espumas se componen de celdas, en cuyo interior se encuentra el gas. Estas celdas pueden presentar o no paredes clasificándose en abiertas (sin pared) o cerradas (con pared) [7]. Así, elegiremos una espuma de celdas cerradas si estamos en una aplicación de aislamiento térmico (disminuimos la conductividad térmica), y con celdas abiertas si queremos un aislamiento acústico (atenuamos las ondas sonoras). Vemos en la Figura 6.19, los dos tipos de celdas posibles.

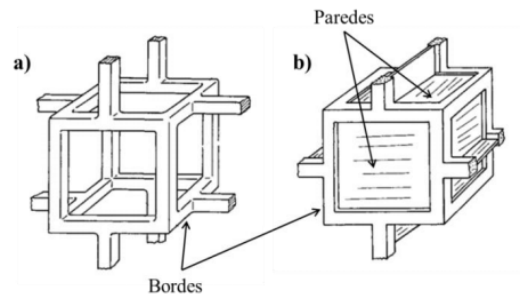


Figura 6.19: Celda cúbica, a) abierta y b) cerrada

Podemos observar en la Figura 6.20, un resumen de comparación de propiedades entre todo tipo de materiales.

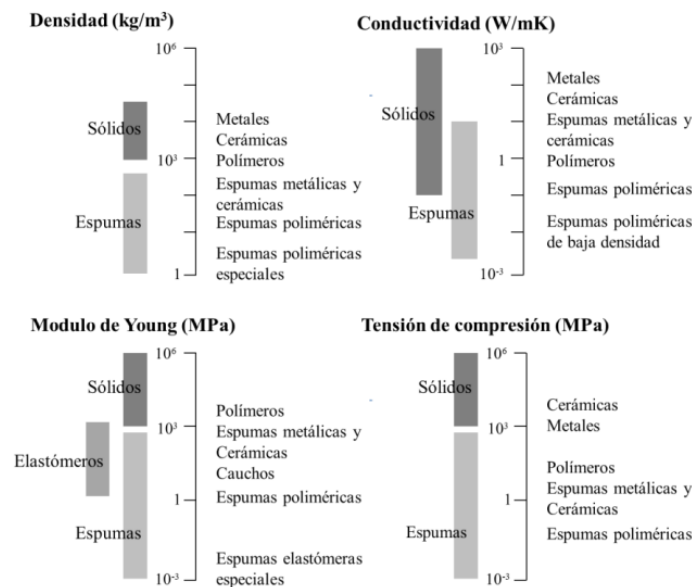


Figura 6.20: Comparación de propiedades de espumas con otros materiales

Las espumas poliméricas, son los materiales celulares más comunes. Presentan celdas cuyos bordes y paredes se componen de un polímero. Los enlaces que presentan los polímeros son de menor intensidad que los cerámicos o los metálicos, lo que se ve reflejado en sus propiedades [7]. Tendremos un rango amplio de densidades posibles, pudiendo clasificar las espumas en:

- Muy ligeras ($\rho = 3 - 50kg/m^3$)
- Ligeras ($\rho = 50 - 200kg/m^3$)
- Medias ($\rho = 200 - 500kg/m^3$)
- Pesadas ($\rho = 500 - 700kg/m^3$)
- Muy pesadas ($\rho = 700 - 900kg/m^3$)

La resistencia de estos materiales es muy inferior a la de las espumas metálicas o cerámicas, así, el polipropileno presenta un módulo de Young de 1.2-1.7 GPa, mientras que en el aluminio observamos hasta 69 GPa [7].

Un factor influyente en las espumas poliméricas es la temperatura de transición vítrea. Podremos clasificar las espumas según su comportamiento elástico como flexibles, semiflexibles, semirrígidas y rígidas. Las dos primeras tendrán su temperatura de transición vítrea por debajo de la temperatura ambiente mientras que las dos últimas la tendrán por encima. Son las flexibles las que se emplean en la fabricación de palas de Pádel.

El objeto de la realización de ensayos sobre la espuma, es debido a que sus propiedades varían con la velocidad de deformación. La espuma aumenta su rigidez debido a altas velocidades de aplicación de carga donde la fase gaseosa del interior no tiene tiempo de evacuarse, aumentando la presión interior.

Analizaremos la influencia de los distintos factores en el aumento de la rigidez [12]:

- **Estructura interna:**

A mayor tamaño de celda, estas son más sensibles a la velocidad de deformación, presentan un notorio aumento de su rigidez con la velocidad de deformación.

A mayor tamaño de celda, mayor flexibilidad tendremos en un análisis estático.

- **Densidad:** A bajas densidades, la tensión máxima admisible aumenta de forma lineal, cuando llegamos a densidades superiores a 87 kg/m^3 con aplicación de cargas dinámicas apenas se aprecian fluctuaciones en la tensión admisible.
- **Velocidad de deformación:** La sensibilidad a esta característica esta determinada por la densidad, a mayor densidad, más sensible será la espuma ante el aumento de la velocidad de deformación. Tendremos un gran incremento de la tensión máxima admisible y del módulo de elasticidad. Observamos en la Figura 6.21, el comportamiento viscoelástico de la espuma.

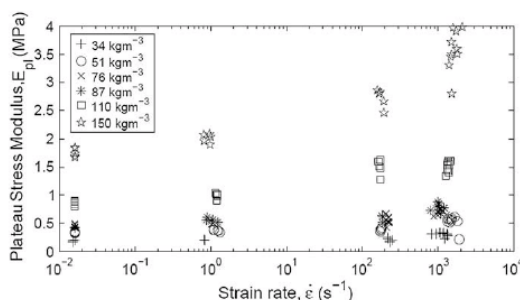


Figura 6.21: Gráfica del comportamiento viscoelástico de la espuma [12]

10. Criterio de Fallo de Tsai-Wu [19]

Los criterios de rotura de los materiales compuestos son de los más complejos y son obtenidos mediante resultados empíricos (fórmulas que deben adecuarse a ensayos experimentales). Se trata del criterio de fallo polinomial más general.

Emplearemos la notación tensorial que se muestra en la ecuación (6.21).

$$F_i \cdot \sigma_i + F_{ij} \cdot \sigma_i \cdot \sigma_j = 1 \quad (6.21)$$

Siendo F_i y F_{ij} dos tensores de orden 2 y 4 respectivamente, los índices i y j serán 1, 2, ..., 6 y σ_i componentes del tensor de tensiones

Particularizando para una lámina ortótropa trabajando en tensión plana, la expresión anterior quedaría como la ecuación (6.22) donde, para unos valores de tensión cualesquiera, la parte izquierda de la igualdad será el índice de fallo, que tendrá como máximo el valor unidad, lo que implicará la rotura.

$$F_1 \cdot \sigma_1 + F_2 \cdot \sigma_2 + F_6 \cdot \sigma_6 + F_{22} \cdot \sigma_2^2 + F_{66} \cdot \sigma_6^2 + 2 \cdot F_{12} \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2 = 1 \quad (6.22)$$

Necesitamos determinar los coeficientes que aparecen en la fórmula (6.22), para ello primeramente, acudimos al ensayo de tracción en la dirección 1 que se esquematiza en la Figura 6.22, donde $\sigma_1 = X$.

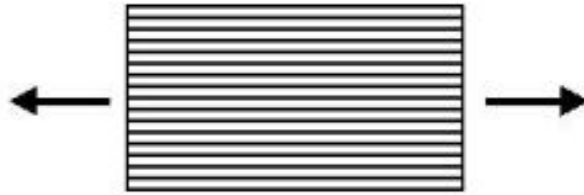


Figura 6.22: Esquema de ensayo de tracción para el criterio de fallo de Tsai-Wu

Aplicando el criterio de *Tsai-Wu*, la rotura se producirá según la ecuación (6.23) (sabiendo que $\sigma_1 = X$).

$$F_1 \cdot X + F_{11} \cdot X^2 = 1 \quad (6.23)$$

Análogamente, procedemos a la realización del ensayo de compresión en la dirección 1 que se esquematiza en la Figura 6.23.

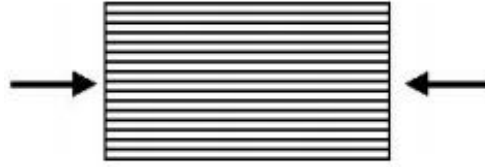


Figura 6.23: Esquema de ensayo de compresión para el criterio de fallo de Tsai-Wu

Sabiendo que $\sigma_1 = -X'$, la rotura se producirá según la ecuación (6.24).

$$-F_1 \cdot X' + F_{11} \cdot X'^2 = 1 \quad (6.24)$$

Con las ecuaciones (6.23) y (6.24), conseguimos los coeficientes F_1 y F_{11} según las ecuaciones (6.25) y (6.26).

$$F_1 = \frac{1}{X} + \frac{1}{X'} \quad (6.25)$$

$$F_{11} = -\frac{1}{X \cdot X'} \quad (6.26)$$

Si realizamos los mismos ensayos sobre la dirección 2, obtenemos los coeficientes F_2 y F_{22} según las ecuaciones (6.27) y (6.28).

$$F_2 = \frac{1}{Y} + \frac{1}{Y'} \quad (6.27)$$

$$F_{22} = -\frac{1}{Y \cdot Y'} \quad (6.28)$$

Pasamos al ensayo de cizalladura que se esquematiza en la Figura 6.24, que corresponderá a la dirección 6.

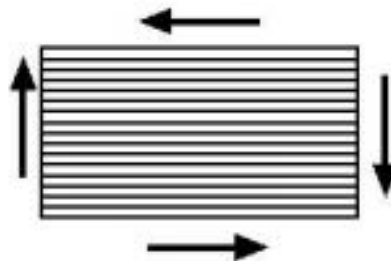


Figura 6.24: Esquema de ensayo de cizalladura para el criterio de fallo de Tsai-Wu

Independiente al criterio de signos, tomamos $\tau_{xy} = S$, por lo que la rotura se producirá según la ecuación (6.29).

$$\pm F_6 \cdot \sigma_6 + F_{66} \cdot \sigma_6^2 = 1 \quad (6.29)$$

El signo \pm dependerá del criterio tomado, pero no es influyente ya que se deduce que $F_6 = 0$ y que $F_{66} = \frac{1}{S^2}$.

Por último, debemos calcular F_{12} , el cual no puede ser obtenido mediante ensayos uniaxiales, por lo que acudimos al ensayo biaxial que se esquematiza en la Figura 6.25.

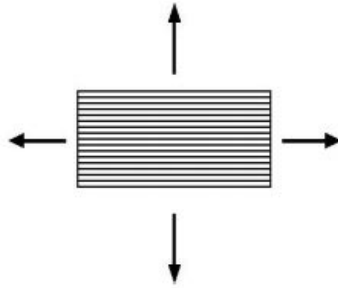


Figura 6.25: Esquema de ensayo biaxial de tracción para el criterio de fallo de Tsai-Wu

Estableceremos que, ambas tensiones producidas sean iguales ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$) podemos agrupar el criterio de fallo de *Tsai-Wu* según la ecuación (6.30).

$$(F_1 + F_2)\sigma^2 + (F_{11} + F_{22} + F_{12})\sigma^2 = 1 \quad (6.30)$$

Si sustituimos los coeficientes y despejamos F_{12} llegamos a la ecuación (6.31).

$$F_{12} = \frac{1}{2 \cdot \sigma^2} [1 - (\frac{1}{X} + \frac{1}{X'} + \frac{1}{Y} + \frac{1}{Y'})\sigma + (\frac{1}{X \cdot X'} + \frac{1}{Y \cdot Y'})\sigma^2] \quad (6.31)$$

Observamos en la ecuación (6.31) como el coeficiente F_{12} no es una propiedad de la lámina, sino que es función de las tensiones aplicadas, es decir, $F_{12} = f(X, X', Y, Y', \sigma_{biaxial})$.

Debido a que la realización de un ensayo biaxial resulta muy costoso, existe la alternativa de establecer una equivalencia con el criterio de Von Mises para la plastificación de un material metálico isótropo, para ello, debemos imponer que $X = X' = Y = Y' = \sigma_y$. Con esto conseguimos que $F_{11} = F_{22} = \frac{1}{\sigma_y^2}$ y aplicando el criterio de fallo tenemos la ecuación (6.32).

$$\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_y}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_y}\right)^2 + 2 \cdot F_{12} \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2 = 1 \quad (6.32)$$

Por otro lado, aplicando Von Mises tenemos la ecuación (6.33).

$$\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_y}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_y}\right)^2 - \frac{\sigma_1 \cdot \sigma_2}{\sigma_y} \quad (6.33)$$

Combinando las ecuaciones (6.32) y (6.33) tenemos que $2F_{12} = -\frac{1}{\sigma_y}$, generalizando a un material anisótropo llegamos a la ecuación (6.34).

$$2F_{12} = -\sqrt{F_{11} \cdot F_{22}} \quad (6.34)$$

Si no se indica lo contrario, el coeficiente F_{12} se suele estimar según la ecuación (6.35) con $-0,5 < F_{12}^* < 0$.

$$F_{12} = F_{12}^* \sqrt{F_{11} \cdot F_{22}} \quad (6.35)$$

11. Aplicaciones de los materiales compuestos

En la Figura 6.26 observamos la importancia de los materiales compuestos en términos de cantidad de fibra usada, observamos la elevada importancia de la fibra de vidrio.

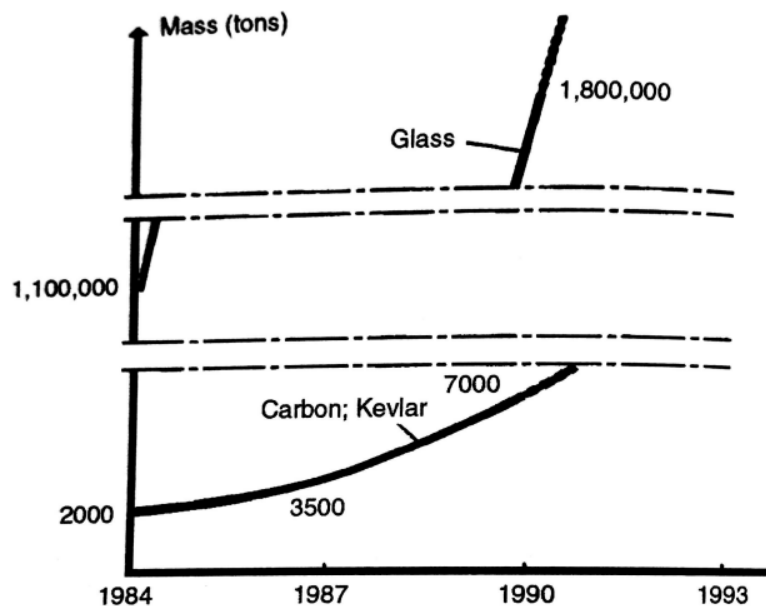


Figura 6.26: Aumento de producción de la fibra, esencialmente de carbono [14]

Tendremos tantas aplicaciones como queramos, el uso de los materiales compuestos es realmente amplio, a continuación veremos algunos casos concretos:

- **Aplicaciones eléctricas y electrónicas.**
- **Aplicaciones en edificación y obras públicas.**
- **Aplicaciones en vehículos de carretera, raíles, marinos y aéreos:**

En la industria aeroespacial, el estabilizador horizontal del F-111 fue el primer componente de materiales compuestos en 1964. En 1986, se diseña el *Voyager Aircraft* compuesto completamente por materiales compuestos, consiguiendo un vehículo volador ligerísimo, que consiguió dar la primera vuelta al mundo sin parar durante 9 días. Otros ejemplos son el F-16 japonés, el helicóptero de ataque *Comanche*, las cabinas de los aviones *Boeing*, compuestos del *Airbus A310-300* y un largo etcétera.

En la industria del motor, tenemos también un amplio abanico de opciones. La fórmula 1, donde el peso del coche es clave, el uso de materiales compuestos para aligerar el vehículo e intentar ser milésimas de segundo más rápido que los rivales. Ejemplos concretos pueden ser, el *McLaren F1*, valorado en 750\$ y el *Mercedes-Benz SLR*.

En cuanto a la industria marina, tenemos lanchas deportivas de competición, industria militar americana, etc.

- **Aplicaciones en energía:** Un claro ejemplo en este ámbito son las aspas de las turbinas de viento generadoras de electricidad.

Capítulo 7

Caracterización y evaluación de propiedades de los materiales

1. Espuma

El núcleo de las palas Marvel estudiadas en este TFG, están compuestas de espuma de polietileno. En este apartado resumiremos los resultados obtenidos por Sergio Caballero Encinas, para más información acerca ensayos de compresión a distintas velocidades realizados, acudir al capítulo 5 de su TFG. Podemos observar los resultados obtenidos en la Tabla 7.1. Observamos el carácter viscoelástico de la espuma, como se ha comentado, al aumentar la velocidad de deformación, observamos el aumento del módulo de elasticidad de la misma, se produce un endurecimiento.

Tabla 7.1: Resumen de resultados del módulo de elasticidad de la espuma obtenidos por Sergio Caballero Encinas

Velocidad	E_x (MPa)
3 m/s	0.417 ± 0.008
4 m/s	1.59 ± 0.02
4.5 m/s	1.6 ± 0.01

Además, se realizaron estimaciones de su densidad, obteniendo un valor de $27,8 \pm 0,9 \text{kg/m}^3$.

2. Pieles

Este apartado, resume el trabajo realizado por Sergio Caballero Encinas de caracterización mecánica de las pieles. Se obtuvo en un trabajo previo al presente TFG, las propiedades de las pieles, debido a ello, simplemente se expondrán los resultados que se obtuvieron, que serán con los que se trabajarán en el modelo numérico. Para una mayor información acerca de los ensayos realizados de tracción y cizalladura, así como la determinación de porcentajes de fibra, acudir al capítulo 4 del TFG de Sergio.

Vemos en las Tablas 7.2 y 7.3, los valores obtenidos por Sergio para la fibra de carbono y la fibra de vidrio respectivamente. A modo de ayuda, se indican las casillas donde se reflejan los resultados en la hora de cálculo *Mic-Mac* [6]. Acudir al TFG de Ismael Burgos de la Rosa para más información del uso de la hoja de cálculo.

Tabla 7.2: Estimación de propiedades por micromecánica en la fibra de carbono

Propiedades experimentales	Propiedades en MIC-MAC		Propiedades estimadas MIC-MAC	
	Propiedad	Casilla	Propiedad	Casilla
$\%V_f = 29\%$	$\%V_f = 24,9\%$	D18		
$\rho = 1266\text{kg/m}^3$	$E_m = 3.35\text{ GPa}$	E18		
$E_1 = E_2 = 32593\text{ MPa}$	$E_f = 205\text{ GPa}$	F18	$E_1 = E_2 = 32500\text{ MPa}$	F7
$E_6 = 2629\text{ MPa}$	$X_m = 40\text{ MPa}$	H18	$E_6 = 2600\text{ MPa}$	F9
			$E_3 = 5190\text{ MPa}$	L6
			$E_4 = E_5 = 2590\text{ MPa}$	L8
$X = Y = 405\text{ MPa}$			$X = Y = 299\text{ MPa}$	C12
			$X' = Y' = 414\text{ MPa}$	C12
$S = 52\text{ MPa}$			$S = 73\text{ MPa}$	C14
$\nu = 0.06$			$\nu_{12} = 0.04$	W25
			$\nu_{12} = 0$	W27

Tanto en las Tablas 7.2 y 7.3 como en la 7.4, tendremos:

- E_m : Módulo de elasticidad de la matriz
- E_f : Módulo de elasticidad de la fibra
- $\%V_f$: Porcentaje volumétrico de fibra
- X_m : Carga de rotura de la matriz
- X, Y : Carga de rotura a tracción en la dirección X, Y
- X', Y' : Carga de rotura a compresión en la dirección X, Y
- S : Carga de rotura a cizalladura
- E_i : Módulo de elasticidad en la dirección i
- ν_{ij} : Coeficiente de Poisson (relación entre la deformación en i y j)

Tabla 7.3: Estimación de propiedades por micromecánica en la fibra de vidrio

Propiedades experimentales	Propiedades en MIC-MAC		Propiedades estimadas MIC-MAC	
	Propiedad	Casilla	Propiedad	Casilla
$\%V_f = 24,9\%$	$\%V_f = 29\%$	D18		
$\rho = 1423\text{kg}/\text{m}^3$	$E_m = 2.5\text{ GPa}$	E18		
$E_1 = E_2 = 12230\text{ MPa}$	$E_f = 81\text{ GPa}$	F18	$E_1 = E_2 = 12200\text{ MPa}$	F7
$E_6 = 1870\text{ MPa}$	$X_m = 93\text{ MPa}$	H18	$E_6 = 1900\text{ MPa}$	F9
			$E_3 = 5190\text{ MPa}$	L6
			$E_4 = E_5 = 2590\text{ MPa}$	L8
$X = Y = 260\text{ MPa}$			$X = Y = 296\text{ MPa}$	C12
			$X' = Y' = 228\text{ MPa}$	C12
			$S = 222\text{ MPa}$	C14
$\nu = 0.15$			$\nu_{12} = 0.09$	W25
			$\nu_{12} = 0$	W27

En el trabajo de sergio, debía tomar valores tridimensionales, pues se modelizan materiales cohesivos, que deben modelados en Patran-Nastran como semisólidos, sólidos que actúan como placas, en nuestro modelo, se modelizan las pieles como tipo *shell*, por lo que solo necesitaremos las propiedades en el plano.

3. Braiding

Esta estimación de propiedades resultará la de mayor complejidad e incertidumbre. Debido a que, el braiding es comercial y está patentado, no se nos facilita la información necesaria de constituyentes, por ello es necesario la realización de ensayos y estimaciones. En la Figura 7.1 se observa el braiding usado en la realización de los perfiles de la pala de pádel.

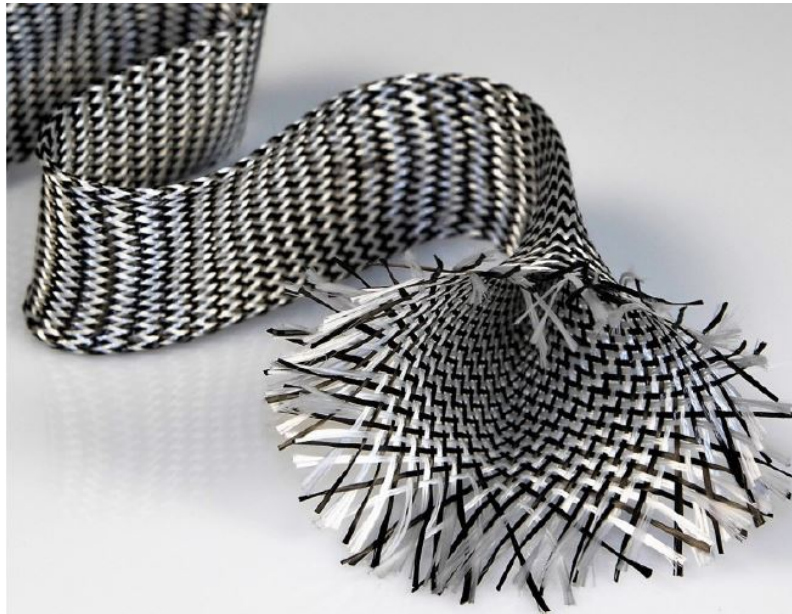


Figura 7.1: Braiding usado en la fabricación de la pala de pádel compuesto por fibra de carbono y fibra de vidrio

El braiding se compone de fibra de carbono y fibra de vidrio como podemos observar en la Figura 7.1. Inicialmente, debemos definir en que proporciones se presentan cada uno de ellos. Para ello, se ha procedido a deshilar el tubo que ha sido cortado a una longitud de 20 centímetros, y analizaremos en función al peso y sabiendo la densidad de cada uno dicho porcentaje:

- Una vez tenemos deshilado nuestro tubo, obtenemos la fibra como se muestra en la Figura 7.2, medimos en un recipiente cuanto pesa cada tipo de fibra en los 20 centímetros que hemos cortado sobre una vástula de precisión y obtenemos que:

Peso del recipiente = 108.001 gramos.

Peso del recipiente + fibra de carbono = 109.433 gramos.

Peso del recipiente + fibra de vidrio = 109.900 gramos.

- Sabiendo los pesos totales, obtenemos cuanta fibra de carbono tenemos y cuanta fibra de vidrio:

Fibra de carbono: 1.432 gramos.

Fibra de vidrio: 1.899 gramos.

- Podemos ya, obtener el porcentaje en peso que se presenta (7.1) y (7.2):

$$\%Fibra_{Carbono} = \frac{Masa_{Carbono}}{Masa_{Total}} = \frac{1,432\text{gramos}}{3,331\text{gramos}} \simeq 0,4 \quad (7.1)$$

$$\%Fibra_{Vidrio} = \frac{Masa_{Vidrio}}{Masa_{Total}} = \frac{1,899\text{gramos}}{3,331\text{gramos}} \simeq 0,6 \quad (7.2)$$



(a) Hilos de fibra de carbono (b) Hilos de fibra de vidrio obtenidos del braiding para el cálculo de % de volumen

Figura 7.2: Separación de materiales en el braiding

Una vez tenemos el porcentaje en masa, tomamos la densidad de la fibra de carbono ($\rho_{carbono} = 1770\text{kg}/\text{m}^3$) y la de vidrio ($\rho_{vidrio} = 2530\text{kg}/\text{m}^3$), sabiendo que el porcentaje de volumen de fibra será del 29% para el carbono y el 25% para el vidrio debido al procedimiento de fabricación, partiremos de un espesor teórico total $e_{composite}$ y obtendremos la relación de este total con e_{vidrio} y $e_{carbono}$. Se realizará paso a paso el procedimiento, comenzando con (7.3) y (7.4):

$$P_{carbono} = (Volumen_{carbono}) \cdot \%FC \cdot \rho_{carbono} = 40 \quad (7.3)$$

$$P_{vidrio} = (Volumen_{vidrio}) \cdot \%FV \cdot \rho_{vidrio} = 60 \quad (7.4)$$

Donde el volumen será $V = \text{espesor} \cdot \text{ancho} \cdot \text{largo}$, coincidiendo el largo y el ancho para ambas fibras, pasamos a (7.5):

$$\frac{e_{carbono}}{e_{vidrio}} \cdot \frac{513,3}{632,5} = \frac{40}{60} \quad (7.5)$$

Obteniendo finalmente (7.6):

$$\frac{e_{carbono}}{e_{vidrio}} = 0,82 \quad (7.6)$$

Por lo que, relacionando este resultado con el espesor total obtenemos una relación del 55 % de espesor para el vidrio y el 45 % de espesor para el carbono.

Teniendo ya en que proporción se presentan, debemos estimar las propiedades de cada una de las fibras mediante la hoja de cálculo *Mic-Mac* [6], para una mayor comprensión de su uso, se de talla en el TFG de Ismael Burgos de la Rosa.

Debemos tener la precaución de que este cálculo, a diferencia del que hizo Sergio en el apartado anterior, no se puede hacer con la compensación de láminas (50 % a 0° y 50 % a 90°), en nuestro caso tendremos el 100 % de la fibra orientada a 30°, que es el ángulo que se ha observado experimentalmente en el tubo de llenado, obteniendo el resumen de propiedades que se muestran en la Tabla 7.4.

Tabla 7.4: Estimación de propiedades por micromecánica de láminas unidireccionales

Propiedades en MIC-MAC	Propiedades estimadas Fibra de carbono	Propiedades estimadas Fibra de vidrio
Propiedades	Propiedades	Propiedades
$\%V_f = 24,9\%$	$E_x = 59.5 \text{ GPa}$	$E_x = 20.25 \text{ GPa}$
$E_m = 2.5 \text{ GPa}$	$E_y = 5.3 \text{ GPa}$	$E_y = 4.04 \text{ GPa}$
$E_f = 81 \text{ GPa}$	$E_s = 2.6 \text{ GPa}$	$E_s = 1.9 \text{ GPa}$
$X_m = 93 \text{ MPa}$	$\nu_{xy} = 0.28$	$\nu_{xy} = 0.26$
	$X = 621 \text{ MPa}$	$X = 590 \text{ MPa}$
	$X' = 562 \text{ MPa}$	$X' = 328 \text{ MPa}$
	$Y = 40 \text{ MPa}$	$Y = 93 \text{ MPa}$
	$Y' = 246 \text{ MPa}$	$Y' = 354 \text{ MPa}$
	$S = 68 \text{ MPa}$	$S = 216 \text{ MPa}$

Capítulo 8

Método de los elementos finitos

1. Introducción

En este apartado, trataremos de aportar al lector las bases necesarias del método de los elementos finitos para facilitar la comprensión del proceso de modelización realizado.

Los **elementos finitos** tienen gran variedad de aplicación en la ingeniería, fluidos, cálculo estructural, acústica, electricidad... En lo que nos concierne, la mecánica de las estructuras, puede ser usado para calcular esfuerzos, desplazamientos, inestabilidades y un largo etcétera.

¿Por qué usar los elementos finitos? Pongamos el ejemplo de nuestra pala de pádel, es sabido, que para todo tipo de cálculos, es necesario saber propiedades del modelo, así por ejemplo, deberíamos ser capaces de describir la piel que envuelve nuestra pala, un proceso bastante complicado. La teoría de los elementos finitos, se basa en discretizar nuestro modelo a líneas, áreas o volúmenes elementales de pequeño tamaño, reduciendo la complejidad del problema que nos atañe.

Podemos definir el análisis de los elementos finitos como un método que genera soluciones aproximadas a problemas de la ingeniería que a menudo se muestran como términos de ecuaciones diferenciales. Podemos realizar particiones de nuestra estructura haciendo que un elevado número de hexaedros o tetraedros, formen la estructura de una pala de pádel (por ejemplo). Cada elemento, generara una solución aproximada de la **variable de interés**, la cual se combinará con el resto de soluciones de los demás elementos para determinar la variable de interés de toda la estructura [13].

Cabe destacar que, obtendremos resultados tan precisos como preciso sea nuestro modelo. Es por ello que la caracterización de la geometría, materiales empleados, condiciones de contorno, etcétera, tienen gran importancia en el análisis.

El método de los elementos finitos, se basa en el cálculo estructural, es por ello por lo que hoy en día, es el método más usado, ya que con el avance de las tecnologías, podemos resolver casi cualquier problema con el que nos encontremos. Eso sí, debemos tener claro lo siguiente: **El ordenador no se equivocará al calcular, el error lo tendrá el humano en la introducción de datos y manejo del software.** Con esta frase se resalta la importancia del conocimiento de la materia para un ingeniero, debemos siempre estar seguros de los resultados obtenidos, siendo necesario un manejo de la materia avanzado, capaz de hacernos reaccionar ante resultados contradictorios, tanto es así que, antes de realizar este método deberíamos preguntarnos:

- ¿Qué pretendemos con este análisis?
- ¿Cómo va a ser la geometría que vamos a analizar?
- ¿Qué condiciones de contorno existen sobre el problema a analizar?
- ¿Qué resultados esperamos obtener?

El método de los elementos finitos tiene 4 bases:

1. Sistema elemental
2. Sistema global
3. Resolución (cálculo de reacciones y desplazamientos)
4. Interpretación (cálculo de esfuerzos, tensiones, etc)

Se exponen a continuación, los principios que se aplican en el método de los elementos finitos:

- Principio de los trabajos virtuales
- Funciones de interpolación
- Síntesis de características globales
- Imposición de condiciones de contorno

Así, cualquier dominio continuo, podemos discretizarlo en tantos elementos finitos como queramos (tiene su influencia, a mayor número de elementos, mayor precisión por lo general pero más caro computacionalmente hablando), denominando al conjunto de elementos **malla o mallado**. Podemos ver en la Figura 8.1, nuestra pala real ensayada y el modelo en elementos finitos conseguido.

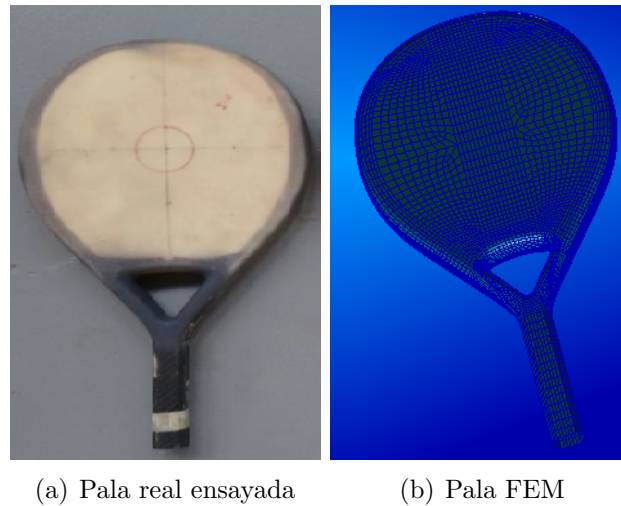


Figura 8.1: Comparación pala real ensayada y modelo en elementos finitos

En la Figura 8.2, se muestran los componentes de un modelo en elementos finitos. Observamos que el método será aplicable a todos aquellos problemas donde aparezcan ecuaciones diferenciales, las cuales estarán condicionadas por las condiciones de contorno en la frontera del dominio sobre el cual se define el problema, a partir de las cuales, se obtendrá la solución global.

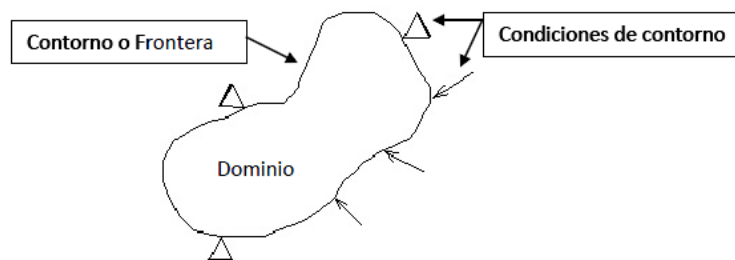


Figura 8.2: Componentes de un MEF

Los llamados *problemas de contorno* se pueden clasificar esencialmente en:

- **Problemas de equilibrio (régimen estacionario):** Tendremos que todas las condiciones de contorno, además de las propiedades, permanecen constantes con el transcurso del tiempo, es decir, el tiempo no es una incógnita. Se obtendrán resultados de desplazamientos y tensiones. En este marco podemos englobar el ensayo cuasi-estático de nuestra pala.

- **Problemas en régimen transitorio:** Serán aquellos en los que, bien las condiciones de contorno, o bien las propiedades a estudiar, varían a lo largo del tiempo. Por lo tanto, también lo harán los resultados obtenidos. Existen muchísimos ejemplos en la vida real, por ejemplo, en este marco encontramos nuestro ensayo a impacto de nuestra pala de pádel.
- **Problemas de valores propios:** Serán aquellos problemas en los que necesitamos conocer unos determinados valores críticos independientes del estado o las solicitaciones presentes. Por ejemplo, imaginemos una estructura metálica, independientemente de la carga que se aplique al pilar, este tendrá una carga crítica de pandeo (o carga crítica de Euler), y esta nos determinará si la carga P que se le aplica es admisible.

Una vez realizado nuestro modelo, necesitaremos una convergencia de malla. Lo que queremos conseguir es obtener unos resultados con un error mínimo y un tiempo computacional mínimo, para ello, obtendremos resultados con diferentes mallados y optaremos por la solución más óptima. En la Figura 8.3 se ve la relación comentada, llega un punto en el que el mallado es lo suficientemente fino para aproximarnos a la realidad y, hacerlos más fino aún, no mejoraría la precisión.

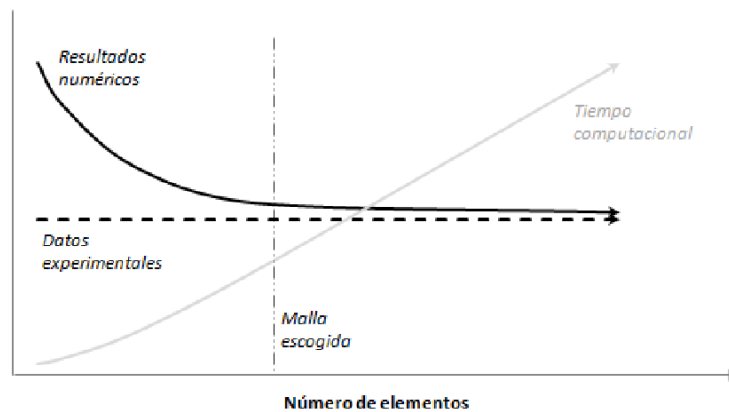


Figura 8.3: Relación entre precisión y coste computacional

2. Cálculo estático lineal

En esta sección, se darán las nociones básicas del cálculo lineal, para ayudar al lector a comprender el procedimiento tanto de cálculo, como de ensayo, así como la exposición de resultados.

Abordamos este apartado comenzando a hablar sobre el problema estático. Cabe mencionar, que en la realidad nada es estático, cualquier calculo que hagamos, si quisiésemos hacerlo con una precisión del 100 % ajustada a la realidad, deberíamos realizar un cálculo en el tiempo. Entra aquí en juego el papel de los ingenieros. Debemos diferenciar cuándo un cálculo, un proceso, un ensayo, en definitiva, cualquier ámbito de la ingeniería, es rentable. Un buen ingeniero será aquel que se aproxime lo suficientemente a la realidad de la forma más eficiente. Con todo esto se quiere decir que, por ejemplo, en el ensayo **cuasi-estático** de nuestra pala de pádel, como su propio nombre indica, no es estático, es una aproximación muy aproximada a la realidad, en el que decimos que la aplicación de la carga es tan lenta, que no se producen efectos dinámicos.

Un cálculo estático y además lineal, es un problema “sencillo” de resolver si trabajamos con elementos finitos. Es tal la potencia computacional desarrollada, que, podemos simular el comportamiento estático de un puente en apenas unos segundos, mientras que, 1 siglo atrás, si se querían soluciones “rápidas” se debían hacer simplificaciones burdas muy del lado de la seguridad.

Por lo que, un análisis estático, se puede resolver con las ecuaciones de la estática, es decir, $\sum F = 0$ y $\sum M = 0$ (sumatorio de fuerzas y momentos igual a cero). Así, mediante el cálculo matricial estático, podremos resolver cualquier estructura, englobando así a nuestra pala de pádel.

Pasamos a la segunda parte del cálculo, la linealidad. Será una idealización de nuestro modelo estático debido a las enormes ventajas que conlleva la aplicación de la linealidad. Dentro del contexto en el que nos encontramos, consideraremos lineal (es decir, que existe proporción por ejemplo 1 a 1) cuando se satisfagan las hipótesis de comportamiento (relación carga-desplazamiento). En la Figura 8.4, observamos lo que se acaba de detallar.

Consideraremos dos tipos de linealidades:

- **Linealidad mecánica:** Supondremos un comportamiento elástico lineal de los materiales como el que se muestra en la Figura 8.4.
- **Linealidad geométrica:** Se considerarán las ecuaciones de equilibrio sin deformar, es decir, debemos cumplir las condición de pequeños desplazamientos para que se puedan aplicar sin errores apreciables. En el caso de no cumplir esta hipótesis, no podríamos aplicar este método porque se induciría esfuerzos de segundo orden, los cuales dependen de la deformación, obteniendo un problema no lineal.

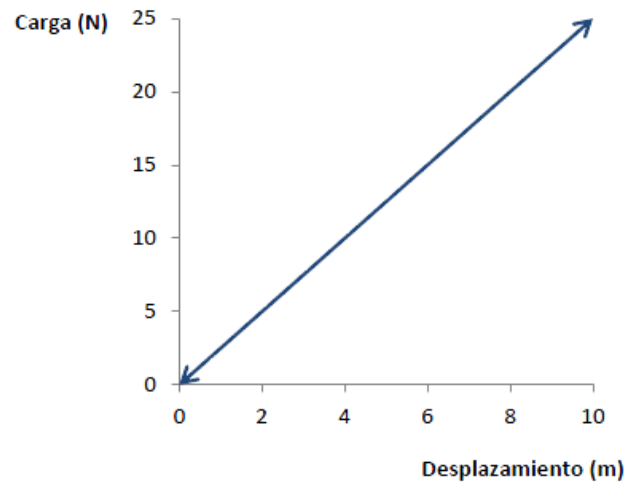


Figura 8.4: Comportamiento teórico de un material elástico-lineal

La aplicación de la linealidad presenta grandes ventajas:

- Permite la aplicación del principio de **superposición**.
- El cálculo de esfuerzos es, para acciones directas, independiente del material de la estructura.
- Al ser válido la aplicación del principio de superposición, si tenemos una aplicación de cargas complejas, podemos separar nuestro problema complejo en varios problemas simples.
- Es muy rápido de calcular para los ordenadores

Así, en nuestro modelo cuasi-estático, al realizar el cálculo lineal, solo necesitaremos un resultado para poder obtener la curva fuerza-desplazamiento.

Por otro lado, partimos de la base que el modelo cuasi-estático sirve para cometer un error menor en el modelo dinámico, es por ello por lo que se aplicará un régimen de cargas bajo, lo que implica que estaremos en el campo elástico, lo que hace que el problema siga siendo de fácil resolución.

Podemos resumir este cálculo con las ecuaciones (8.1) y (8.2), donde se observa el principio de superposición comentado.

$$f(x + y) = f(x) + f(y) \quad (8.1)$$

$$f(\alpha \cdot x) = \alpha \cdot f(x) \quad (8.2)$$

3. Cálculo de impacto

Pasamos al cálculo dinámico, donde entrará en juego otra variable a tener en cuenta, el tiempo.

Además, debemos introducir el concepto de no linealidad, ya que, en la naturaleza, nada es perfectamente lineal, solo que, existen varias situaciones en la que puede ser despreciable la no linealidad, será el caso en el que influyan pocas variables. Por lo que, en este análisis, no podremos satisfacer la ecuación de la linealidad, ahora se satisface la ecuación (8.3).

$$f \sqsubset k \cdot u \tag{8.3}$$

Antiguamente, debíamos suponer un comportamiento lineal a todo lo que nos rodea, ya que, no era factible realizar un cálculo lineal manualmente. Con la aparición de los elementos finitos, a ciertos niveles, esta idealización deja de ser aceptable, para poder llevar a cabo adecuadamente el análisis debemos conocer los posibles orígenes de las no linealidades.

Podemos diferenciar distintos tipos de no linealidades:

- No linealidad geométrica:** Este tipo de no linealidad es muy común en las estructuras metálicas, donde tenemos más flexibilidad que en estructuras de hormigón por ejemplo. Si tenemos un alto régimen de carga, en el cual la suposición de pequeños desplazamientos deja de ser válida, se generarán momentos de segundo orden tal y como se muestra en la Figura 8.5, comenzando a ser un proceso iterativo en caso de querer calcularlo manualmente.

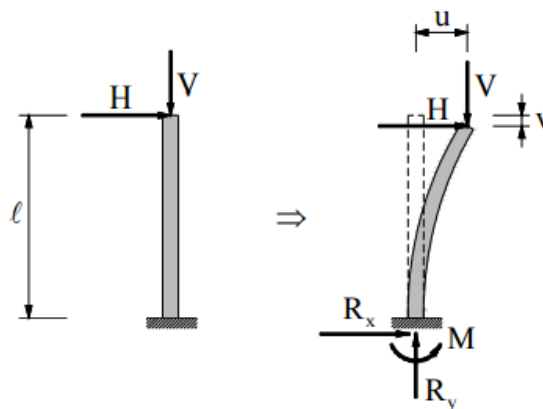


Figura 8.5: Esquema de no linealidad geométrica debido a la existencia de grandes desplazamientos

Observamos además en la Figura 8.5, el fenómeno de “*Follower force*”, donde la suposición de que la carga mantiene constante el ángulo de aplicación respecto a la propia barra, deja de ser cierto.

- No linealidad de los materiales:** En la naturaleza, es usual que los materiales, a bajo régimen de cargas, presenten una tendencia lineal. Es cuando aumentamos la importancia de las cargas, cuando podemos comenzar a tener problemas. Un claro ejemplo es la curva de comportamiento de cualquier metal, tenemos un comportamiento elástico (deformación recuperable) hasta llegar al límite de fluencia, a partir del cual entramos en el campo plástico (donde ya la deformación producida es permanente). En la Figura 8.6 se muestran las curvas de comportamiento de un metal y de un material hiperelástico.

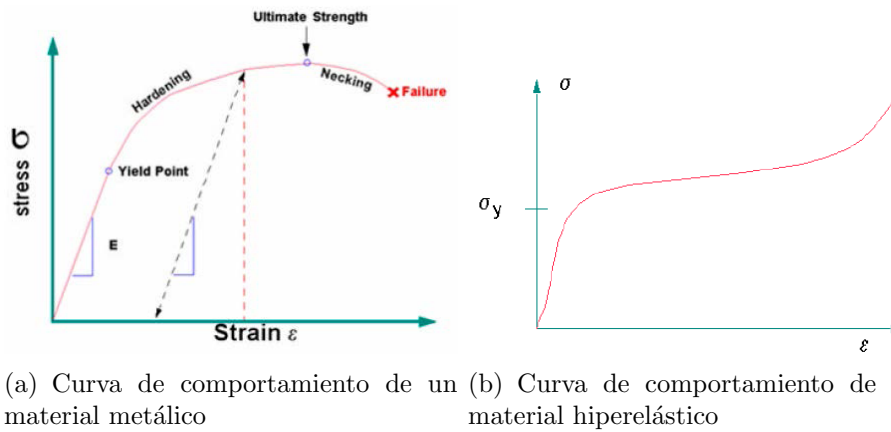
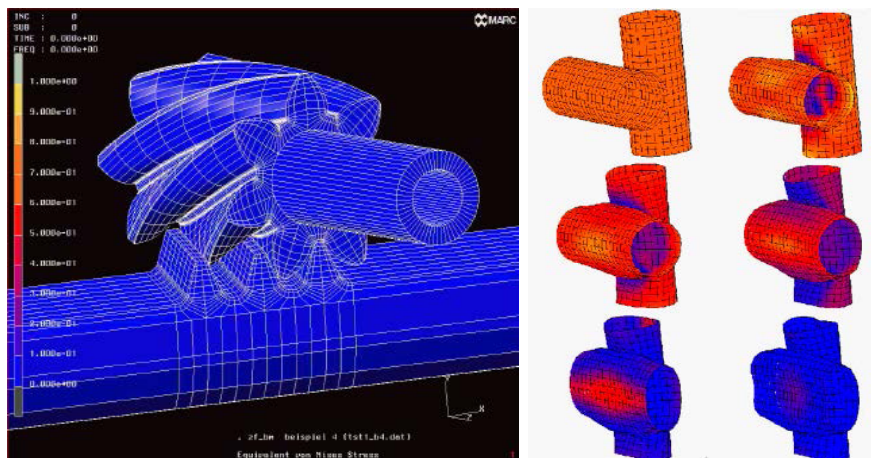


Figura 8.6: Comparación comportamiento material metálico e hiperelástico

- Condiciones de contorno:** Por un lado, tendremos las situaciones de contacto. En nuestro caso (impacto), el contacto se producirá en un espacio de tiempo extremadamente corto, por lo que además tendremos fenómenos de fricción y por lo tanto transmisión de calor. Observamos en la Figura 8.7, en el primer caso una sección de contacto variable y en el segundo, además, las grandes deformaciones producidas por el impacto.



(a) Contacto sección variable (b) Contacto en impacto

Figura 8.7: Ejemplos de contactos en la ingeniería

- **Proceso de Fabricación:** Por último, debido al proceso de fabricación que se detalla en el capítulo 4 de este TFG, observamos que al realizarse las palas a mano, tendremos el error humano, por lo que se puede prever que de una pala a otra pueda escasear la repetitividad, y en el caso de no realizar una buena fabricación, pueden aparecer no linealidades en nuestra pala como por ejemplo pueda ser el caso de inclusiones de resina en la propia espuma.

Viendo los tipos de no linealidades que se presentan, resulta evidente que la probabilidad de que la no linealidad esté presente en este TFG, con problemas de impacto, contactos, altas velocidades de deformación y proceso manual de fabricación.

4. Discretización temporal

Dado que los impactos son problemas en régimen transitorio, estos requieren de algo más que una discretización espacial de la malla convencional, necesitaremos dar incrementos de tiempo (discretización temporal).

A continuación se detallan dos métodos de cálculo para la discretización en el tiempo y posteriormente, se justificará el empleo de uno de ellos.

4.1. Método implícito

El uso del método implícito es aconsejable para estudios en los cuales no se producen grandes aceleraciones, como puede ser el estudio de una estructura sometida a cargas permanentes a lo largo del tiempo, o por ejemplo, la simulación del ensayo de tracción. En definitiva, podríamos decir que este método es más próximo a la estática que a la dinámica, adaptándose mejor a situaciones de cuasi-equilibrio, donde cada instante puede ser considerado un problema de equilibrio y por tanto, los intervalos de tiempo serán “grandes” [10].

Sea un instante de tiempo actual t_n , el método implícito se basa en calcular las incógnitas en un paso de tiempo posterior (X_{n+1}), planteando las ecuaciones dinámicas en el mismo instante de la incógnita (t_{n+1}). El mayor inconveniente de este principio es que el sistema de ecuaciones a resolver es un sistema de ecuaciones dependiente, con lo que para obtener una solución en el tiempo, deberá llevarse a cabo un proceso iterativo. El método más usual y extendido en el análisis dinámico de mecánica de sólidos es el método de β - Newmark para integrar numéricamente [10]. Pasamos a detallar el procedimiento en las ecuaciones (8.4) y (8.5).

$$a_{n+\gamma} = (1 - \gamma) \cdot a_n + \gamma \cdot a_{n+1} \quad (8.4)$$

$$v_{n+1} = v_n + a_{n+\gamma} \cdot \Delta t \quad (8.5)$$

Donde:

- a_i = Aceleración en el instante i
- v_i = Velocidad en el instante i
- Δt = Incremento de tiempo
- γ = Constante numérica: $0 \leq \gamma \leq 1$

Y el desplazamiento lo obtenemos mediante las ecuaciones (8.6) y (8.7).

$$a_{n+\gamma} = (1 - 2\beta) \cdot a_n + 2\beta \cdot a_{n+1} \quad (8.6)$$

$$u_{n+1} = u_n + v_n \cdot \Delta t + 1/2 \cdot a_{n+\gamma} \cdot (\Delta t)^2 \quad (8.7)$$

Donde:

- u_i = Desplazamiento en el instante i
- β = Constante numérica: $0 \leq 2\beta \leq 1$

Newmark demostró que valores estables para las constantes γ y β son $\gamma = 1/2$ y $\beta = 1/4$, lo cuál hace igual el valor de la aceleración en los dos casos e implica la consideración de que la aceleración media se conserva en todo el intervalo de tiempo [10].

En la Figura 8.8, se muestra a modo resumen, el procedimiento de análisis que se emplea en el método implícito.

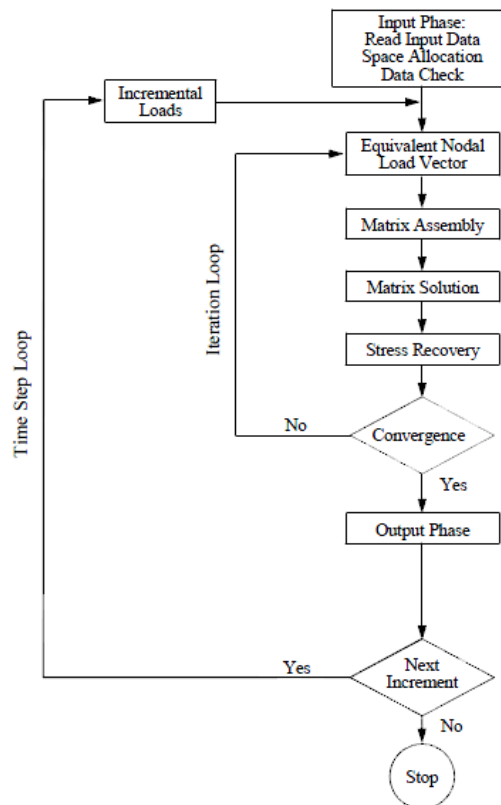


Figura 8.8: Diagrama de flujo del método implícito [10]

4.2. Método explícito

A diferencia del método implícito, el explícito es aconsejable para situaciones en las que aparezcan grandes aceleraciones y el tiempo de análisis sea pequeño, ya que como se verá más adelante, se requiere que el paso del tiempo no supere un valor crítico. El ejemplo claro de aplicación del método explícito es la simulación a impacto que se genera en este TFG. El método explícito también tiene aplicación en el estudio de explosiones, donde se genera una gran liberación de energía en un instante corto de tiempo. En general, cualquier análisis transitorio de corta duración

donde la propagación de las ondas de tensión sea de gran importancia, es abordable por el método explícito.

A diferencia del método implícito, se buscarán las incógnitas X_{n+1} en el periodo de tiempo t_n , es decir, tendremos un sistema determinado, donde no será necesario iterar. El algoritmo de resolución 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 $t_{n+1/2}$, de forma que si representamos el avance sobre la línea de tiempo se obtiene la Figura 8.9 [9].

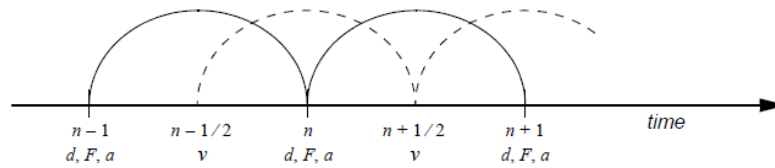


Figura 8.9: Información sobre la línea del tiempo en el método explícito

Se realiza el cálculo siguiendo las ecuaciones (8.8) y (8.9).

$$v_{n+1/2} = v_{n-1/2} + a_n \cdot \Delta t \quad (8.8)$$

$$u_{n+1/2} = u_n + v_{n+1/2} \cdot \Delta t \quad (8.9)$$

Si siguiendo con un planteamiento de masas concentradas tal y como se indica en [16], se obtiene el siguiente planteamiento matricial, definiendo la aceleración den un instante cualquiera n [8], acorde a la ecuación (8.10), despejando, obtenemos la ecuación (8.11).

$$[M] \cdot (a_n) = (F_n^{ext}) - (F_n^{int}) \quad (8.10)$$

$$(a_n) = [M]^{-1} \cdot (F_n^{residual}) \quad (8.11)$$

Donde:

M = Matriz de masa

- (F_n^{ext}) = Vector de cargas externas
- (F_n^{int}) = Vector de cargas internas

Como consecuencia de estar basado en un esquema de masas concentradas, la matriz de masas resulta diagonal, por lo que su inversión es trivial [8]. Y, además, como se explicó anteriormente, supongamos que partimos del tiempo $n = 0$, donde tenemos nuestras condiciones iniciales conocidas, al tener todos los parámetros en el

tiempo n , salvo las incógnitas en el $n+1$, todo es conocido, por lo que no necesitamos almacenar las matrices que se almacenan en el método implícito, así, reducimos considerablemente el coste computacional al aumentar la complejidad del problema.

Como desventaja, tendremos que debemos cumplir la condición de Courant para que sea un método estable, que no es más que una modificación de la condición C.F.L. (Número de Courant-Friedrich-Levy) aplicada a la mecánica del sólido. Podemos ver la condición de Courante en la ecuación (8.12) [11].

$$\Delta t < \Delta t_{critico} = \frac{L}{c} = \frac{2}{\omega_{maximo}} \tag{8.12}$$

Donde:

- L = Longitud del elemento
- c = Velocidad del sonido en el material
- ω_{maximo} = Frecuencia propia máxima del sistema
- Δt = Tiempo crítico para que la onda de tensión recorra el elemento. El método explícito requiere de calcular un mayor número de pasos de tiempo forzosamente, pero que comparados con la forma implícita, son de pequeña complejidad y tampoco requiere iteraciones que controlen los valores residuales, sino que el salto de tiempo se produce de forma continua. Se muestra en la Figura 8.10, un diagrama de flujo que detalla el procedimiento de cálculo en el método explícito.

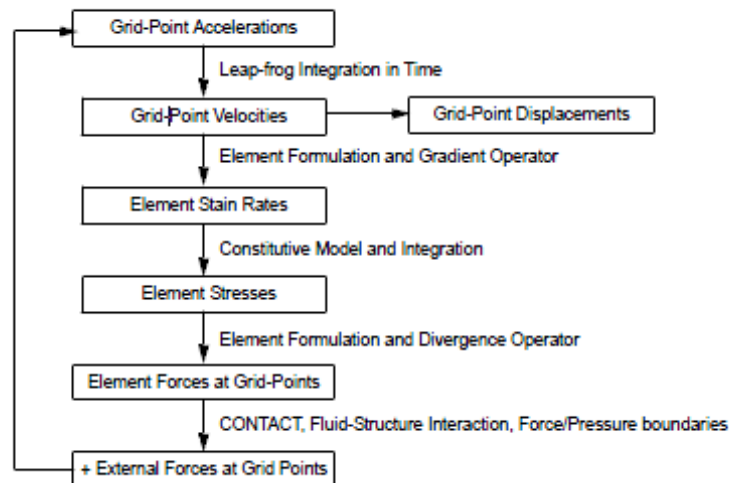


Figura 8.10: Flujo de cálculo del método explícito

La condición de Courant que implica un elevado número de pasos, obliga a que el tiempo de estudio sea reducido comparándolo con el método implícito, aunque suficiente para los casos que abarca.

4.2.1. Justificación de la elección del método explícito

En este TFG, se realiza el análisis mediante el método explícito ya que en resumen tenemos las siguientes características:

- **Método explícito:**

Necesarios pequeños pasos de tiempo (Δt) para el análisis.

Necesarios un mayor número de *substep* o pasos de cálculo.

Pequeño tiempo de cálculo en cada *subset*.

- **Método implícito:**

Posibilidad de un mayor paso de tiempo (Δt).

Necesarios un menor número de **substep**.

Grandes tiempos de cálculo en cada *subset*.

A la vista del resumen argumentado, en el cálculo de un problema de impacto, estamos forzados a realizar pequeños pasos de tiempo Δt por lo que, siendo absolutamente necesario, el análisis se realiza por el método explícito debido al muy notable ahorro computacional que genera esta decisión.

En general, según aumenta el tamaño del modelo y el número de no linealidades, el método explícito resultará más rentable que el implícito, ya que el coste computacional crece de forma lineal en el caso explícito, mientras que en el caso implícito lo hace de forma exponencial. Vemos de forma gráfica lo comentado en las Figura 8.11.

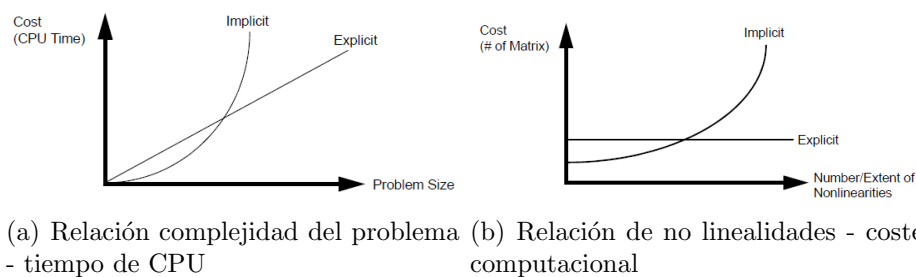


Figura 8.11: Comparación de coste computacional entre método explícito y método implícito

Resumimos que este TFG reúne las características idóneas para ser calculado mediante el método explícito ya que:

- Tenemos un problema de impacto, donde actúan contactos y materiales no lineales, por lo que el método explícito resultará más rentable a medida que aumenta la no linealidad.

- Tendremos situación de contacto y fricción, por lo que para garantizar la precisión, podemos requerir un pequeño paso de tiempo, con lo que podemos aprovechar la condición de Courant para recurrir a la sencillez de cálculo del método explícito.
- Los problemas de impacto se ven involucrados en altas frecuencias, en los cuales lo importante es conocer cómo se propagan las ondas de tensión y choque, cuyo período de transición son relativamente pequeños.

Además, una de las grandes ventajas del uso del software cálculo *Nastran*, es su ayuda. En las Figuras 8.12, 8.13, 8.14 y 8.15, vemos de forma tabulada, las recomendaciones que se realizan en función del problema al que nos enfrentemos.

Material Nonlinearity	Implicit	Explicit
Linear isotropic elastic (metals)		
Nonlinear isotropic elastic (rubber materials)		
Linear orthotropic elastic (composites)		
Elastic-perfectly plastic (limit analysis)		
Elastoplastic, strain hardening (metals)		
Viscoelastic (polymers)		
Restricted orthotropic (metal-forming)		
Damage accumulation and failure		
Tearing and failure		
Explosive detonation		

Figura 8.12: Ámbito de aplicación de método explícito e implícito 1

Deformation Nonlinearity	Implicit	Explicit
Infinitesimal strains and rotations		
Infinitesimal strains and finite rotations		
Finite strains and rotations		
Large strains (100% plus) and large rotations		
(Multi) Material flow		

Figura 8.13: Ámbito de aplicación de método explícito e implícito 2

Contact Nonlinearity	Implicit	Explicit
Small displacement gaps		
Gaps with friction		
Large displacement gaps		
Contact surfaces		
Single surface contact		
Fluid-structure interaction		

Figura 8.14: Ámbito de aplicación de método explícito e implícito 3

Motion	Implicit	Explicit
Static (infinite)		
Quasi-static (noninertial)		
Vibration, fundamental modes		
Shock and vibration		
Stress wave propagation		
Shock wave propagation		
High Frequency Dynamics		
Detonation waves		

Figura 8.15: Ámbito de aplicación de método explícito e implícito 4

Capítulo 9

Modelo de elementos finitos

1. Modelo de simulación en Patran-Nastran

Cabe destacar la relevancia de realizar una simulación previa de estudio por los beneficios económicos que ello conlleva. Por ejemplo, en el caso que se centra este TFG, imaginemos que cada vez que quisiésemos probar las propiedades de uno u otro elemento, tuviésemos que fabricar una pala, sería un dinero perdido por completo. Mientras que si podemos realizar una simulación previa, podemos ahorrarnos muchos ensayos de prototipos defectuosos.

1.1. Geometría

1.1.1. Pala de Pádel

Para la realización de la geometría, partimos de los modelos de palas reales que nos proporciona *Shark Pádel*, pero no es viable la realización de la geometría partiendo desde cero debido a la complejidad de la misma. Por ello, partimos del modelo en negativo del molde empleado en *Shark Pádel* para la elaboración de las palas, el cual podemos observar en la Figura 9.1, la placa que sustenta a la base del molde que se observa en el proceso de fabricación, pero en nuestro análisis no nos es útil.

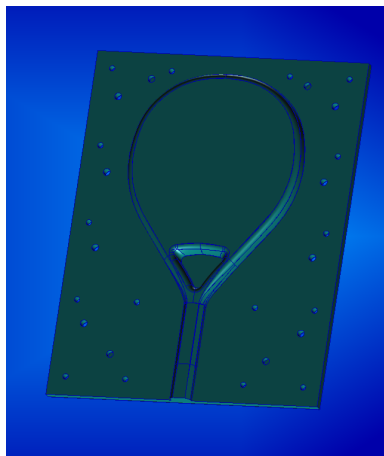
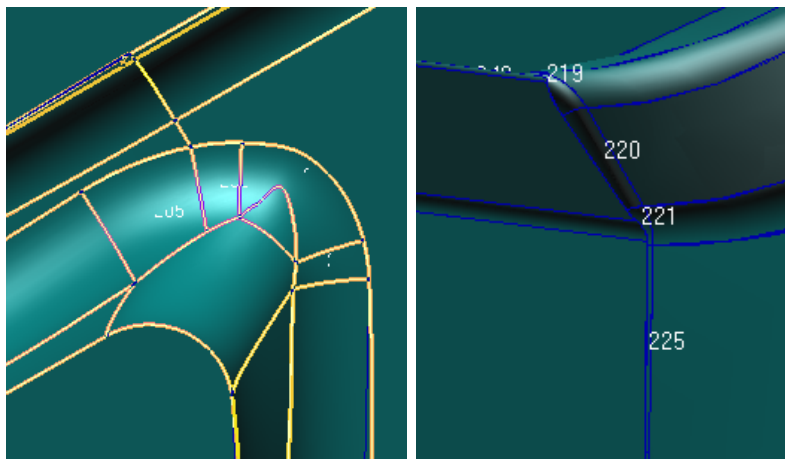


Figura 9.1: Modelo de partida proporcionado por *Shark Pádel*

Partimos de la mitad del modelo. El inconveniente es que el modelo dado en la Figura 9.1 es “demasiado” preciso, aspecto necesario para la fabricación en CNC (que necesita mucho detalle), pero no así en nuestro caso, donde queremos caracterizar el comportamiento estructural de la pala, por lo que realizaremos simplificaciones en la geometría dada para facilitar la realización del modelo. En la Figura 9.2, podemos observar algunas de las simplificaciones que serán necesarias realizar, añadiendo además la complejidad de que se trata de una “cáscara” de la pala, debemos añadirle por tanto el sólido de espuma y el orificio del braiding.



(a) Esquina situada en la esquina del corazón del modelo base de la pala
(b) Transición del mango al co-de la razón de la pala en el modelo base de la pala

Figura 9.2: Zonas a simplificar en el modelo de elementos finitos final

1.1.2. Impactador

Se realizarán los ensayos con el impactador propio de la máquina *INSTRON CEAST 9350* en lugar de una bola real de pádel debido a que buscamos la reproducibilidad del ensayo que se nos asegura con este impactador, y no introducir elementos cuyo comportamiento o bien es desconocido o bien puede variar de un ensayo a otro, en definitiva, queremos analizar lo que le sucede a la pala, no a la pelota.

Para la simulación en el software *Patra-Nastran*, se opta por una bola de acero de 20mm de diámetro, haciendo coincidir el punto de impacto en el modelo con el real. Cabe destacar que el impactador solo estará en el ensayo dinámico.

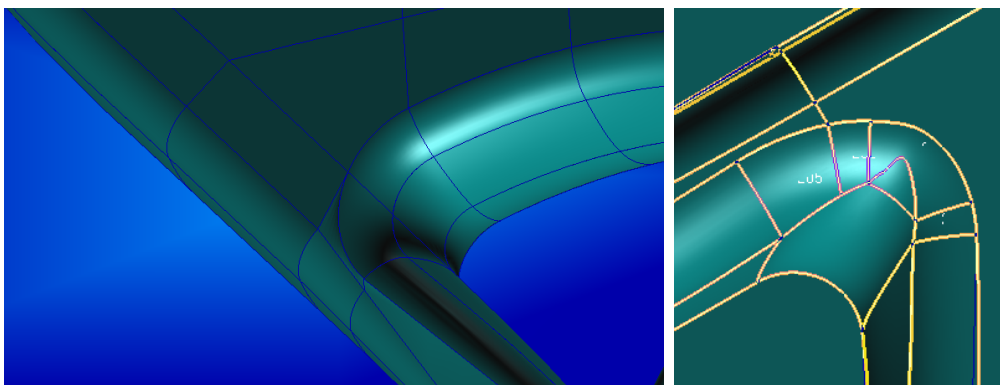
1.1.3. Simplificaciones geométricas realizadas

Tras el proceso de definición de la geometría, llegamos finalmente al modelo geométrico final que se muestra en la Figura 9.3, en la cual observamos una geometría con transiciones suaves, realizando cortes a la misma en función del interés del mallado y de la posición donde se llevan a cabo los ensayos.



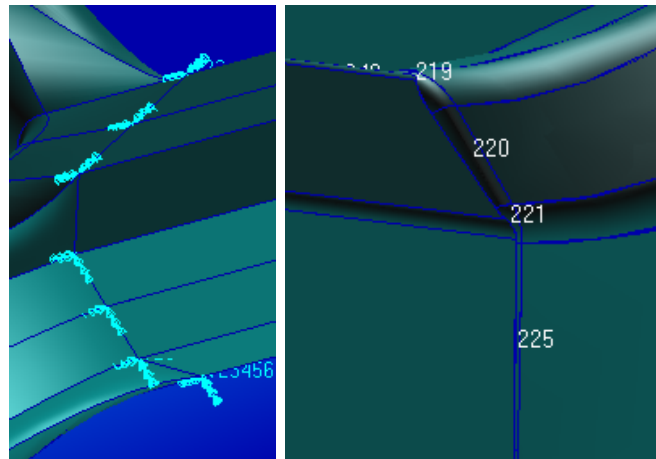
Figura 9.3: Geometría final del modelo en elementos finitos

En las Figuras 9.4 y 9.5, podemos observar como se han suavizado las irregularidades más “llamativas” del modelo base.



(a) Esquina situada en la esquina del corazón del modelo final de la pala
(b) Esquina situada en la esquina del corazón del modelo base de la pala

Figura 9.4: Comparación simplificación 1 para el mallado en el FEM



(a) Transición del mango al corazón de la pala en el modelo final de la pala
(b) Transición del mango al corazón de la pala en el modelo final de la pala

Figura 9.5: Comparación simplificación 2 para el mallado en el FEM

Además, observamos en la Figura 4.4, como existe cierta curvatura en la pared interior del braiding en contacto con la espuma. En nuestro modelo final, esta pared se ha realizado plana.

Por último, debido a que hemos realizado el empotramiento del mango, y no vamos a tener la influencia de la pared intermedia generada, esta no se ha tenido en cuenta.

1.2. Materiales - Modelo estático

En este apartado, definiremos los materiales introducidos en el modelo estático, para posteriormente mostrar la tarjeta de material introducida en cada caso en Nastran.

1.2.1. Espuma

Tendremos un material isótropo, con un módulo de elasticidad de 0.4 MPa y un coeficiente de Poisson 0.04, en el TFG de Sergio Castillo Encinas, se comprueba la baja influencia del coeficiente Poisson, por lo que analizaremos la influencia del módulo de elasticidad dando distintos valores.

Para introducirlo en el modelo estático, tomaremos la tarjeta de Nastran **MAT1**, la cual se muestra en la Figura 9.6.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
MAT1	MID	E	G	NU	RHO	A	TREF	GE	
	ST	SC	SS	MCSID					

Figura 9.6: Tarjeta de propiedades de material isótropo MAT1

En nuestro modelo, las propiedades serán las que se muestran en la Tabla 9.1.

Tabla 9.1: Propiedades introducidas en Nastran para la espuma

MAT1	1	.417	-	.01	2.78-7	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Como vemos, no son necesarias todas las propiedades, de hecho, la densidad solo será necesaria para el modelo dinámico.

1.2.2. Fibra de carbono sarga 2x2 de 3K y 200 g/m² con ensimaje epoxi

Tendremos un laminado equilibrado, dispuesto en el mango. Se tratará de un material ortótropo y lo introduciremos con la tarjeta de materiales de Nastran **MAT8** que se muestra en la Figura 9.7.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
MAT8	MID	E1	E2	NU12	G12	G1Z	G2Z	RHO	
	A1	A2	TREF	Xt	Xc	Yt	Yc	S	
	GE	F12	STRN						

Figura 9.7: Tarjeta de propiedades de material ortótropo MAT8

En nuestro modelo, introduciremos las propiedades necesarias que se muestran en la Tabla 9.2.

Tabla 9.2: Propiedades introducidas en Nastran para el carbono equilibrado

MAT8	5	32500.	32500.	.05	2600.	2600.	2600.	1.27-9
-	-	-	-	304.	411.	304.	411.	73.

1.2.3. Vidrio de las pieles

Tendremos un laminado equilibrado, la piel exterior de la zona de impacto. Se tratará de un material ortótropo y lo introduciremos con la tarjeta de materiales de Nastran **MAT8** que se muestra en la Figura 9.7.

En nuestro modelo, introduciremos las propiedades necesarias que se muestran en la Tabla 9.3.

Tabla 9.3: Propiedades introducidas en Nastran para el vidrio equilibrado

MAT8	2	12200.	12200.	.09	1900.	1900.	1900.	1.43-9
-	-	-	-	298.	228.	298.	228.	234.

1.2.4. Malla de carbono tubular de 40 mm y 39,80 g/m lineal para Palas de Padel

Tendremos el *braiding* con una lámina de fibra carbono y una de vidrio orientados a 30 y -30°. Introduciremos las propiedades de este material como una tarjeta **MAT8** de Nastran que se muestra en la Figura 9.7, como un material ortótropo plano.

En nuestro modelo, introduciremos las propiedades necesarias que se muestran en la Tabla 9.4.

Tabla 9.4: Propiedades introducidas en Nastran para el carbono unidireccional

MAT8	4	59500.	5300.	.028	2600.	2600.	2600.	1.27-9
-	-	-	-	450.	504.	100.	100.	40.

1.2.5. Malla de vidrio tubular de 40 mm y 39,80 g/m lineal para Palas de Padel

Tendremos el *braiding* con una lámina de fibra carbono y una de vidrio orientados a 30 y -30°. Introduciremos las propiedades de este material como una tarjeta **MAT8** de Nastran que se muestra en la Figura 9.7, como un material ortótropo plano.

En nuestro modelo, introduciremos las propiedades necesarias que se muestran en la Tabla 9.5.

Tabla 9.5: Propiedades introducidas en Nastran para el carbono unidireccional

MAT8	3	20250.	4040.	.26	1900.	1900.	1900.	1.43-9
-	-	-	-	450.	500.	80.	90.	60.

1.3. Materiales - Modelo dinámico

En este apartado, definiremos los materiales introducidos en el modelo estático, para posteriormente mostrar la tarjeta de material introducida en cada caso en Nastran. Necesitaremos adaptar las tarjetas de materiales al ensayo dinámico con el analizador **SOL700** de Nastran.

1.3.1. Espuma

Tendremos un material isótropo, con un módulo de elasticidad de 0.217 MPa y un coeficiente de Poisson 0.04, se han realizado análisis de influencia del módulo elástico, al igual que en el modelo estático pero, en principio, no tendremos en cuenta el aumento de rigidez del material debido al comportamiento viscoelástico.

Para introducirlo en el modelo dinámico, tomaremos la tarjeta de Nastran **MATD001**, la cual se muestra en la Figura 9.8.

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

Figura 9.8: Tarjeta de propiedades de material isótropo MATD001

En nuestro modelo, las propiedades serán las que se muestran en la Tabla 9.6.

Tabla 9.6: Propiedades introducidas en Nastran para la espuma SOL700

MATD001	3	2.64-11	.2	.01	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-

Cabe destacar que en este caso si será necesario la introducción de la densidad ya que la masa, como ya sabemos influye en el ensayo dinámico.

1.3.2. Fibra de carbono sarga 2x2 de 3K y 200 g/m² con ensimaje epoxi

Tendremos un laminado equilibrado, dispuesto en el mango. Se tratará de un material ortótropo y lo introduciremos con la tarjeta de materiales de Nastran **MAT8** que se muestra en la Figura 9.9.

En nuestro modelo, introduciremos las propiedades necesarias que se muestran en la Tabla 9.7.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
MATD2OR	MID	RO	EA	EB	EC	PRBA	PRCA	PRCB	
	GAB	GBC	GCA	AOPT	G	SIGF			
	XP	YP	ZP	A1	A2	A3			
	V1	V2	V3	D1	D2	D3	BETA		

Figura 9.9: Tarjeta de propiedades de material ortótropo MATD2OR

Tabla 9.7: Propiedades introducidas en Nastran para el carbono equilibrado SOL700

MATD2OR	2	1.27-9	32600.	32600.	1.	.04	-	-
-	2600.	2590.	2590.	-	-	-	-	-

La tarjeta de material **MATD2OR** está pensada para el *SOL700* actuando como tipo *shell*, pero es necesario introducirle el módulo elástico en los 3 ejes, pero el último de ellos no será considerado.

1.3.3. Vidrio de las pieles

Tendremos un laminado equilibrado, la piel exterior de la zona de impacto. Se tratará de un material ortótropo y lo introduciremos con la tarjeta de materiales de Nastran **MATD2OR** que se muestra en la Figura 9.9.

En nuestro modelo, introduciremos las propiedades necesarias que se muestran en la Tabla 9.8.

Tabla 9.8: Propiedades introducidas en Nastran para el vidrio equilibrado SOL700

MATD2OR	1	1.43-9	12200.	12200.	1.	.08	-	-
-	1800.	1770.	1770.	-	-	-	-	-

1.3.4. Malla de carbono tubular de 40 mm y 39,80 g/m lineal para Palas de Padel

Tendremos el *braiding* con una lámina de fibra carbono y una de vidrio orientados a 30 y -30°. Introduciremos las propiedades de este material como una tarjeta **MAT8** de Nastran que se muestra en la Figura 9.9, como un material ortótropo plano.

En nuestro modelo, introduciremos las propiedades necesarias que se muestran en la Tabla 9.9.

Tabla 9.9: Propiedades introducidas en Nastran para el carbono unidireccional SOL700

MATD2OR	5	1.27-9	59500.	5300.	1.	.28	-	-
-	2600.	2600.	2600.	-	-	-	-	-

1.3.5. Malla de vidrio tubular de 40 mm y 39,80 g/m lineal para Palas de Padel

Tendremos el *braiding* con una lámina de fibra carbono y una de vidrio orientados a 30 y -30°. Introduciremos las propiedades de este material como una tarjeta **MATD2OR** de Nastran que se muestra en la Figura 9.9, como un material ortótropo plano.

En nuestro modelo, introduciremos las propiedades necesarias que se muestran en la Tabla 9.10.

Tabla 9.10: Propiedades introducidas en Nastran para el carbono unidireccional SOL700

MATD2OR	6	1.43-9	20250.	4040.	1.	.26	-	-
-	1900.	1900.	1900	-	-	-	-	-

1.3.6. Impactador

No podemos olvidar que, en el modelo dinámico, también debemos simular el impactador. Tendremos una esfera de acero como simulación de la máquina de impacto.

Para introducirlo en el modelo dinámico, tomaremos la tarjeta de Nastran **MATD001**, la cual se muestra en la Figura 9.8.

En nuestro modelo, las propiedades serán las que se muestran en la Tabla 9.11.

Tabla 9.11: Propiedades introducidas en Nastran para la espuma SOL700

MATD001	4	5.72-7	210000.	.3	5300.
---------	---	--------	---------	----	-------

1.4. Laminados realizados

En este apartado estableceremos el orden del laminado empleado en cada zona, así como sus espesores:

- **Superficie de golpeo:** Estará compuesto por 3 láminas de fibra de vidrio con un espesor cada una de 0.33 mm, ya que estas han sido equilibradas (mismo módulo de elasticidad en X e Y), las dispondremos formando 0° con el eje X.
- **Perfil:** Comenzando desde la parte superficial hacia la interna, tendremos las mismas 3 capas de fibra de vidrio de 0.33 mm de espesor cada una que componen la **superficie de golpeo**. Seguimos con el braidding que se ha modelado como una primera capa de fibra de vidrio tubular de espesor 0.121 mm y una última capa de 0.099 mm de la fibra de carbono tubular.

- **Contacto tubo espuma:** Estará compuesto únicamente por el braiding, por lo que situaremos una primera capa de fibra de vidrio tubular de espesor 0.121 mm y una última capa de 0.099 mm de la fibra de carbono tubular.
- **Corazón golpeo:** Superficialmente, tendremos las mismas 3 primeras capas de fibra de vidrio que componen la **superficie de golpeo**. Además, se le añaden 2 capas de fibra de carbono de 0.39 mm de espesor. Al igual que en la superficie de golpeo se comenta, esta fibra de carbono ha sido equilibrada, por lo que las dispondremos formando 0^a con el eje X.
- **Corazón puente:** En esta zona dispondremos dos capas de fibra de carbono externamente (con las mismas características que las que se emplean en el **corazón golpeo**), y por el interior tendremos el braiding ya comentado.
- **Mango:** Como se ha expuesto anteriormente, se ha simplificado la pared intermedia, por lo que las propiedades de materiales introducidas son análogas a las de **corazón puente**.

1.5. Condiciones de contorno

En este TFG, no se trata de ensayar un golpeo real de un jugador de pádel, sino de ensayar el comportamiento de una pala. Por ello, tratamos de simular el utillaje comentado anteriormente, por lo que se empotrará el mango, a diferencia de si simulásemos una mano humana, ya que esta permitiría giro y no tendrá la rigidez de una pala de acero.

1.5.1. Modelo estático

Trataremos de simular los ensayos realizados en la pala. Debido a que se realizará un cálculo lineal sin tener en cuenta estados de rotura, cualquier fuerza que proporcione una deformación que esté dentro del rango de pequeñas deformaciones, servirá para realizar la curva de rigidez de nuestro modelo.

Se realiza un empotramiento del mango, tratando de asimilar nuestro modelo al ensayo real.

1.5.2. Modelo dinámico

Desplazamientos

Se ha realizado una convergencia de resultados para ver qué condiciones de contorno se aproximan más a la realidad. No tiene una excesiva influencia en los resultados, pero hemos optado por apoyar la cara inferior del mango, dejando libre el “despegue” de la pala y la placa superior.

Velocidad inicial

En este caso, no tendremos carga como tal aplicada, en lugar de ello, simularemos el impactador, al cual le aplicaremos una velocidad que se corresponderá con la energía aplicada en el ensayo. El cálculo de esta velocidad lo podemos ver reflejado en las ecuaciones (9.1) y (9.2).

$$h = \frac{\text{Energía}}{\text{masa} \cdot \text{gravedad}} = \frac{2,36J}{2,41kg \cdot 9,8m/s^2} = 0,0998m \quad (9.1)$$

$$v_o = \sqrt{2g(h - h_o)} = \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot (0,0998 - 0,02)} = 1,251m/s \quad (9.2)$$

Donde:

- v_o : Velocidad inicial de la esfera, la cual se impone en el modelo de Patran.
- h_o : Altura inicial de la esfera respecto a la cara superior de la pala, medida desde el punto radial más cercano a la pala
- h : Altura que es necesaria para que, por efecto de gravedad, se consiga la energía deseada

Contactos

Definiremos dos contactos, ya que en nuestro modelo, los nodos que forman el sólido del núcleo y la superficies son coincidentes, no necesitaremos imponer el contacto entre ellos pues, existe por defecto.

Por lo tanto, tendremos que definir el impactador y la superficie de la pala como superficies de contacto.

Inercia

Debido a que se trata de un problema dinámico, además de tener en cuenta que debemos definir las densidades de los materiales porque influye la masa, debemos imponer la fuerza de gravedad en la Tierra, como es sabido, de $9,8m/s$.

1.6. Elementos empleados

En este apartado, comentaremos los elementos empleados para la realización del mallado.

1.6.1. Elementos volumétricos tipo CHEXA y CPENTA

Son elementos cúbicos CHEXA, con capacidad de unir de 8 a 20 nodos. En nuestro modelo hemos utilizado **CHEXA8**, es decir, elemento hexagonal de 8 nodos. Estos 8 nodos poseen 3 grados de libertad, los responsables del desplazamiento en las 3 direcciones espaciales, debido a la integración reducida, el uso de este tipo de elementos puede conllevar problemas con la energía de *Hourglass*, este efecto de Hourglass será comentado posteriormente. En la Figura 9.10, se muestra gráficamente un elemento tipo CHEXA8.

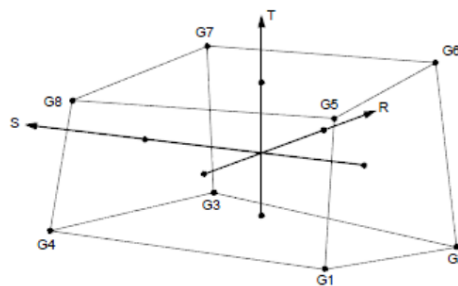


Figura 9.10: Elemento volumétrico tipo CHEXA de 8 nodos

En la zona de golpeo de la pala, los elementos volumétricos se consiguen por extrusión de superficiales, por ello, la presencia de elementos triangulares implica que, al extruirlos, obtendremos elementos con forma de pentaedros. Podemos observar esta tipología de elemento en la Figura 9.11.

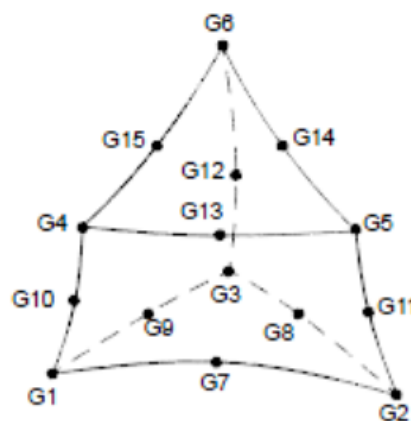
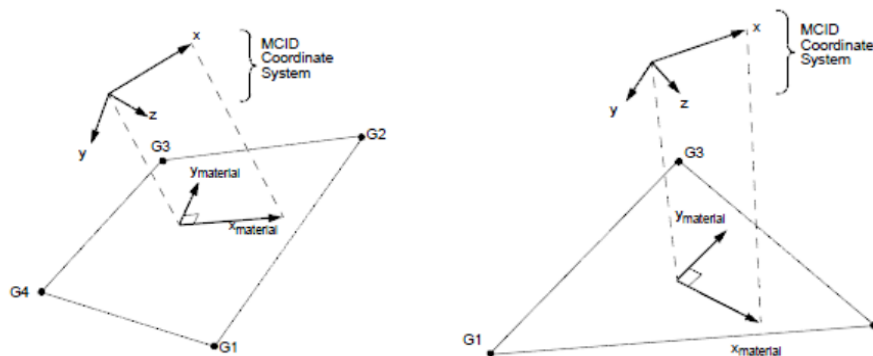


Figura 9.11: Elemento volumétrico con forma de pentaedro tipo CPENTA de hasta 15 nodos

Podemos observar como en ningún momento hemos hecho referencia a la orientación de los elementos sólidos, esto es debido a que caracterizan la espuma, la cual se ha introducido como material isótropo.

1.6.2. Elementos superficiales tipo CQUAD y CTRIA

En la realización de un modelo en elementos finitos, por lo general se busca siempre de conseguir el máximo número posible de elementos cuadrados o cúbicos, pero esto no es siempre posible debido a la geometría que pueda tener la pieza. Es por ello por lo que debemos recurrir a los elementos triangulares. En la Figura 9.12, se muestran los elementos superficiales empleados, tanto el CQUAD4 (con 4 nodos que componen el elemento) como el CTRIA3 (con 3 nodos que componen el elemento), así como sus ejes locales de orientación.



(a) Elemento superficial de 4 nodos tipo CQUAD4 (b) Elemento superficial de 3 nodos tipo CTRIA3

Figura 9.12: Elementos superficiales empleados en el modelo de elementos finitos.

A diferencia de lo sucedido en los elementos sólidos, aquí si tendrá gran influencia la orientación del elemento, ya que las propiedades de los perfiles se han definido en función a esta orientación.

1.7. Mallado

Para el mallado y el posterior análisis de convergencia del mismo, se ha recurrido a la parametrización del modelo para así realizar un análisis más rápido y automático (Véase el apéndice A de este TFG).

El proceso de parametrización se expone en el apéndice correspondiente de este mismo TFG, por ello en este apartado simplemente se expondrá la disposición del mallado.

Debido a la compleja geometría, los sólidos generados en el corazón de la pala que se muestran en la Figura 9.13, requiere un mallado fino para adaptarse perfectamente a su geometría por lo que, a raíz de esta disposición de la malla se extenderá

al resto del modelo. Como ya se puede adelantar, tendremos un modelo pesado debido a la complejidad del mismo y la exigencia de un fino mallado.

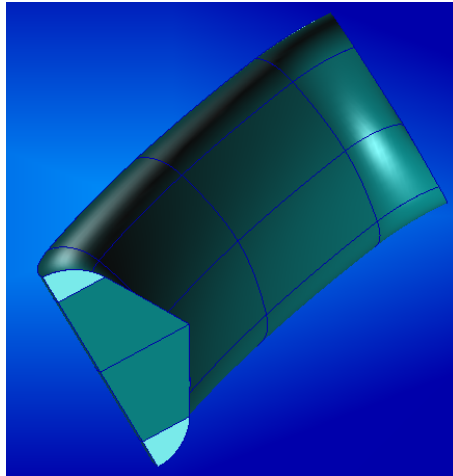


Figura 9.13: Volumen de difícil mallado en el corazón del mango que obliga a un mallado fino en el modelo en elementos finitos

En todo el mallado se ha realizado una disposición de una “*semilla*” que hará que los nodos coincidan con los puntos que definamos. En principio se ha realizado un mallado aproximado según la experiencia en anteriores estudios, posteriormente, se pasa a un refinado de la malla basándonos en la convergencia de malla.

Patran nos proporciona un algoritmo automático que genera una esfera de radio R con un mallado mediante elementos cúbicos tipo **CHEXA8**, por lo que no es necesario realizar un proceso de convergencia de malla, el estudio se realiza sobre la pala, no sobre la esfera.

1.7.1. Mallado del modelo estático

En este modelo, se ha tratado de minimizar el número de elementos en el centro de la pala, con el fin de un ahorro computacional, concentrando los elementos en las zonas de difícil mallado y en los vértices. Se muestra en la Figura 9.14, este aspecto comentado del mallado del modelo estático.

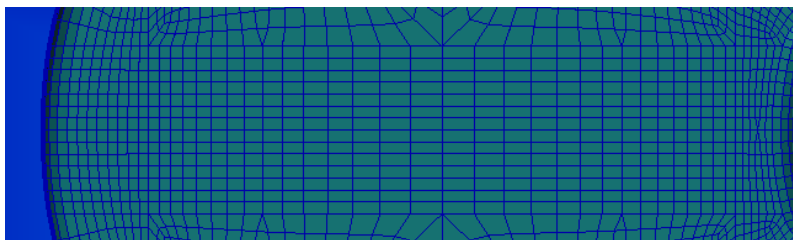


Figura 9.14: Mallado realizado en el modelo estático en elementos finitos

Se muestra en la Figura 9.15, el mallado final realizado sobre la pala en el modelo estático.



Figura 9.15: Modelo en elementos finitos final, mallado realizado

1.7.2. Mallado del modelo dinámico

En este mallado se realiza una concentración de elementos en la zona de impacto, con el objetivo de recoger la máxima información posible en este punto, ya que será el punto de correlación. En la Figura 9.16, se observa la concentración de elementos bajo el impactador.

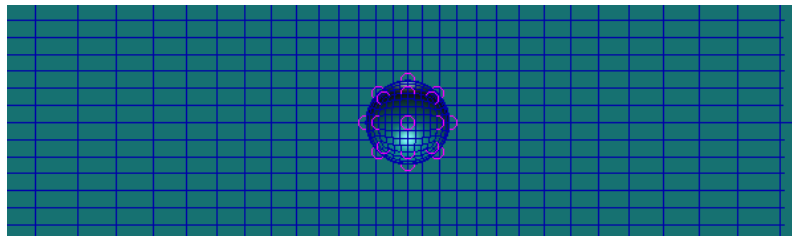


Figura 9.16: Mallado realizado en el modelo dinámico en elementos finitos

Por último, en la Figura 9.17 observamos como queda nuestro impactador mallado con el algoritmo interno de *Patran*.

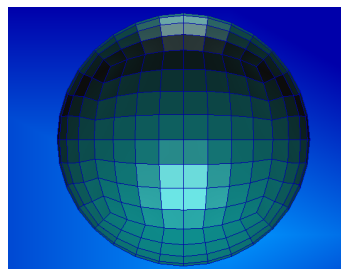


Figura 9.17: Mallado realizado sobre el impactador en el modelo dinámico

1.8. Orientación de los elementos

Un factor clave para la introducción de propiedades, será la orientación de las láminas, ya que está influirá notablemente en el comportamiento de los materiales.

Comenzamos con la orientación de las superficies simples, como el mango o las superficies de golpeo, y en general, todas aquellas en las que no influya la curvatura del perfil. Simplemente, en la introducción de propiedades, indicaremos que se realice siguiendo un vector, por ejemplo se ha usado el eje negativo de la X para indicar los 0°. En la Figura 9.18, se muestra el procedimiento a seguir para imponer la orientación de las propiedades en función de un vector. Otro método para imponer esta misma dirección sería en lugar de *vector*, seleccionar *CID* y escoger el sistema de referencia deseado.



Figura 9.18: Introducción de la orientación en las propiedades en función de un vector en Patran

Sin embargo, para las superficies con curvatura como la de los perfiles, necesitamos otro método, ya que en lugar de recoger esta curvatura, se orientan en función a dicho vector causando un modelo erróneo. Para ello, debemos orientar los ejes locales de los elementos superficiales, abrimos patran y seleccionamos: *Elements, Action: Modify, Object: Element, Method: Shell orientation y Type: Guide Element*. Establecemos la tolerancia (estándar de 30 °) y procedemos a seleccionar nuestro elemento guía y los elementos que queremos que lo sigan. El resultado no es que todos los elementos seleccionados tengan los mismos ejes que el guía, en lugar de ello, se realizan sucesivos giros de 90°, ya que cada elemento tendrá variaciones en las direcciones, lo que queremos hallar es que, por ejemplo, todos los ejes X locales de los elementos vayan en el mismo sentido.

Una vez hemos conseguido cambiar los ejes a los elementos deseados, seguimos con un proceso similar al de la Figura 9.18, es el mostrado en la Figura 9.19, donde le introducimos *Real Scalar* y el valor de -1, que *Patran* internamente tiene asociado a que se realice la orientación en función a los ejes locales de los elementos.

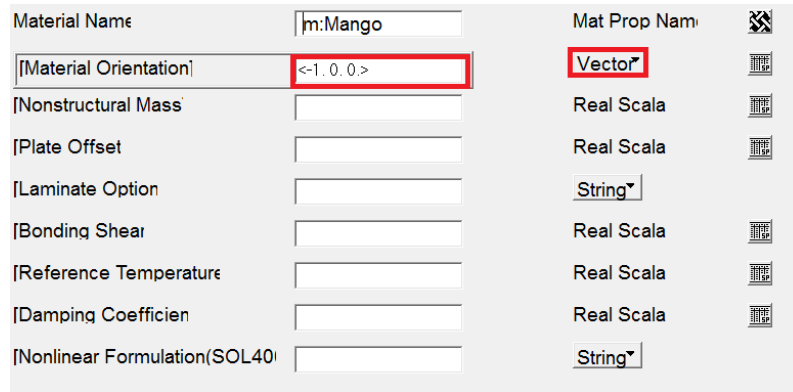


Figura 9.19: Introducción de la orientación en las propiedades en función de los ejes locales en Patran

Finalmente, si deseamos ver los resultados de la orientación de las propiedades, vamos a: *Utilities, Display, Plot Material Orientation...* y finalmente seleccionamos los elementos cuyas orientaciones de los materiales en este caso deseamos ver. Vemos en la Figura 9.20 la orientación conseguida en los perfiles de la pala.

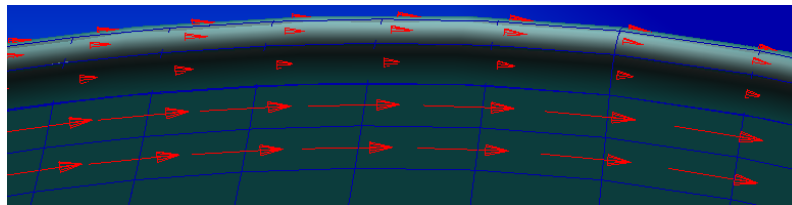


Figura 9.20: Orientación de las propiedades introducidas en el modelo de la pala visualizado en Patran

1.9. Energía de Hourglass

Este efecto es comúnmente conocido como el efecto “reloj de arena”. Es esencialmente un modo de deformación falso de una malla de elementos finitos, resultante de la excitación de grados de libertad de energía cero. Por lo general, se manifiesta como un mosaico de formas de elementos en forma de zig-zag o de reloj de arena (Figura 9.21), donde los elementos individuales se deforman severamente, mientras que la sección de malla total no está deformada. Esto sucede en los elementos de integración reducidos sólidos hexaédricos 3D y en los respectivos elementos cáscaras 3D tetraédricos y elementos sólidos 2D.

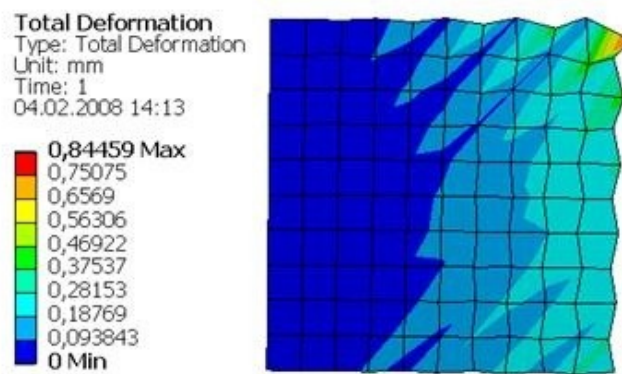


Figura 9.21: Efecto de Hourglass o reloj de arena en un ejemplo realizado en una superficie cuadrada.

Para comprobar si este factor es relevante en nuestro modelo, se muestra en la Figura 9.22, como tenemos una energía de Hourglass de apenas 20 mJ, dos órdenes menos de magnitud que el ensayo realizado, por lo que determinamos que no es un factor influyente en los resultados.

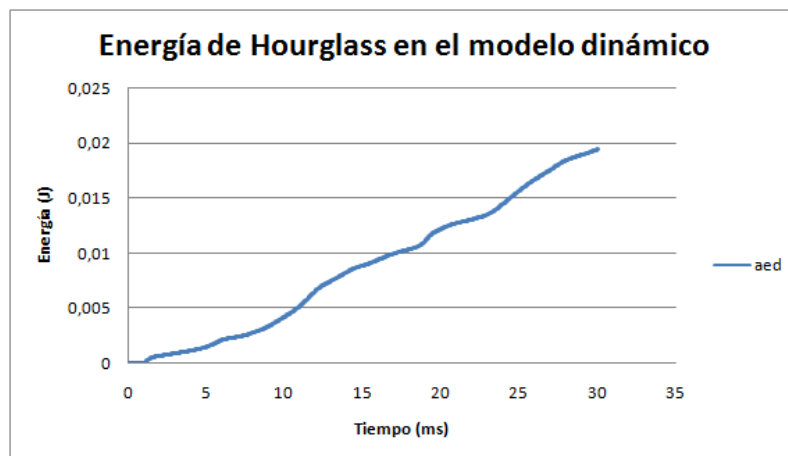


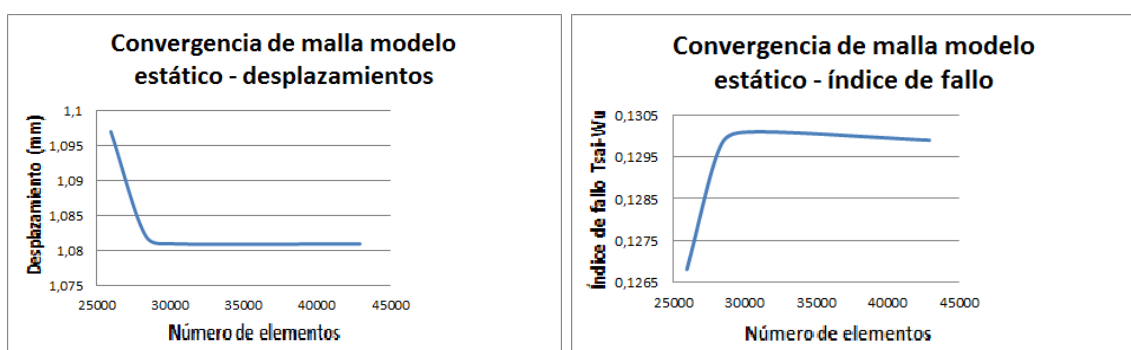
Figura 9.22: Energía de Hourglass en el modelo dinámico con un impacto de 2.36 J

1.10. Convergencia de malla

Trataremos para cada modelo el proceso de convergencia de malla en este apartado, la convergencia de malla consiste en la graficación de una relación entre un resultado característico (tensiones, desplazamientos,...) y un parámetro característico del tamaño de la malla (número de elementos totales, número de divisiones en una línea, tamaño de elementos,...). Este proceso permite identificar el tamaño de malla necesario para un error mínimo acorde a una reducción de coste computacional, además del error asociado a la propia malla.

1.10.1. Modelo estático

En este apartado, hemos realizado dos tipos de convergencia de malla para asegurarnos de que el mallado del modelo es eficiente, en primer lugar, se muestra en la Figura 9.23, vemos que la convergencia se alcanza muy rápido en la convergencia de desplazamientos, incluso con el primer modelo con un mallado basto con un total de 25957 elementos, obtenemos una diferencia de resultados de un 1.48 %, por lo que incluso ese sería válido. Del lado de la seguridad, hemos realizado una convergencia de malla con el índice de fallo de Tsai-Wu [1], ya que por tensiones sabemos que la convergencia es más precisa. Este proceso de convergencia se muestra también en la Figura 9.23, observamos también una convergencia muy rápida, la diferencia entre el modelo más fino y el más basto es de un 2.39 %. Esta rápida convergencia del modelo es debido a la propia exigencia del mallado, ya que tendremos geometrías difíciles de mallar tal y como hemos detallado anteriormente, por lo que, ya de primeras se nos exigirá un mallado fino, por ello tanto afinando el mallado superficialmente como en sentido vertical en el sólido de la espuma, apenas logramos diferencias.



(a) Convergencia - Desplazamientos

(b) Convergencia - Índice de Tsai-Wu

Figura 9.23: Convergencia del mallado del modelo estática realizada con desplazamientos en el punto de referencia (LVDT 1) e índice de fallo

Como se ha visto, la convergencia es rápida, y el tiempo computacional no varía de un modelo a otro en estático, por lo que se ha optado por un mallado con un total de **30694** elementos.

1.10.2. Modelo dinámico

En el modelo dinámico, hemos realizado la convergencia con la convergencia de malla con el resultado característico de la fuerza de contacto y como parámetro característico el número total de elementos, el cual surge después de realizar distintas modificaciones de tamaño en el mallado.

En la Figura 9.24, observamos la rápida convergencia del modelo, tenemos, al igual que en el anterior apartado, una convergencia muy rápida debido al mallado inicial exigido por la geometría. La diferencia de resultados máxima es de un 3%, en este modelo si influirá el tamaño del mallado en cuanto al coste computacional, hemos realizado los cálculos con un modelo de **33567** elementos, donde podemos decir que el la malla ya converge. El proceso total de cálculo tarda en torno a las 6 horas mientras que para el mallado más fino realizado con 42513 elementos el proceso tardó un total de 14 horas, obteniendo unos resultados idénticos. En este caso podemos observar la gran importancia del proceso de convergencia de malla.

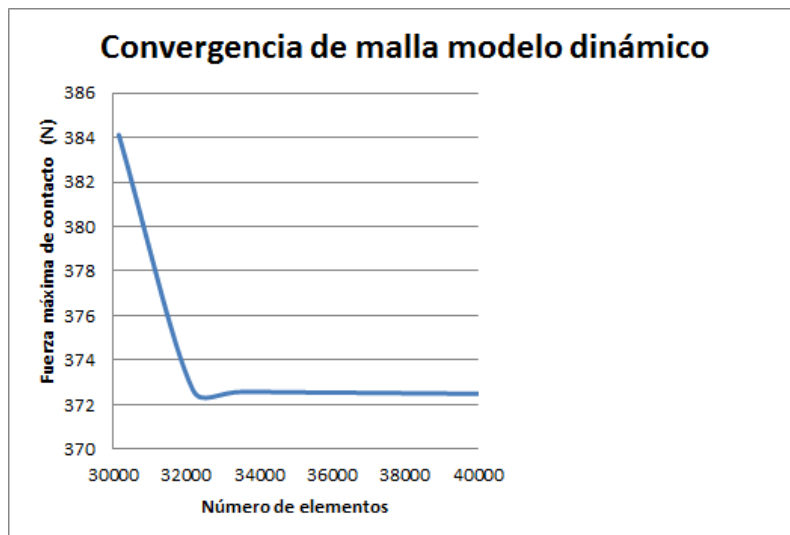


Figura 9.24: Convergencia de malla del modelo dinámico - Fuerza de contacto

Capítulo 10

Ensayos sobre la pala

1. Ensayos de rigidez estática

En este apartado se comentarán los ensayos realizados a la pala frente a carga estática. Se detallarán posiciones de montaje, medida y posicionamiento de la pala y utillaje.

1.1. Codificación de los ensayos

Previo a toda explicación, para la comprensión de gráficas se detalla la codificación usada, tomemos como base la siguiente codificación, N-C-E-POS-MED:

- **N:** Corresponderá al número de pala, tendremos 3 palas ensayadas, este número estará en romano por lo que podrá ser I, II o III.
- **C:** Corresponderá a la cara de la pala, tendremos 2 caras, podrán ser A o B.
- **E:** Corresponderá al ensayo realizado, podrán ser:

FC: Fuerza centrada (Figuras 10.1,10.2 y 10.3).

FE: Fuerza en el extremo (Figura 10.6).

TOR: Ensayo de torsión (Figuras 10.4 y 10.5).

- **POS:** Corresponderá a la posición de medida, es decir, la disposición de los LVDT, tendremos 3 posiciones en FC, 2 en TOR y 1 en FE.
- **MED:** Corresponderá al LVDT o medidor del que se hace referencia.

1.2. Descripción del ensayo

1.2.1. Ensayo a flexión simple en el centro de la pala

Se realiza este ensayo para caracterizar la rigidez a flexión de nuestra pala. Mediante las diferentes medidas podremos caracterizar la rigidez global del modelo y cómo se deforma.

Se encuentran marcadas todas las palas, en ambas caras, con cruces y un sistema de colores, procedemos a ver un ejemplo de una pala en la Figura 10.1.

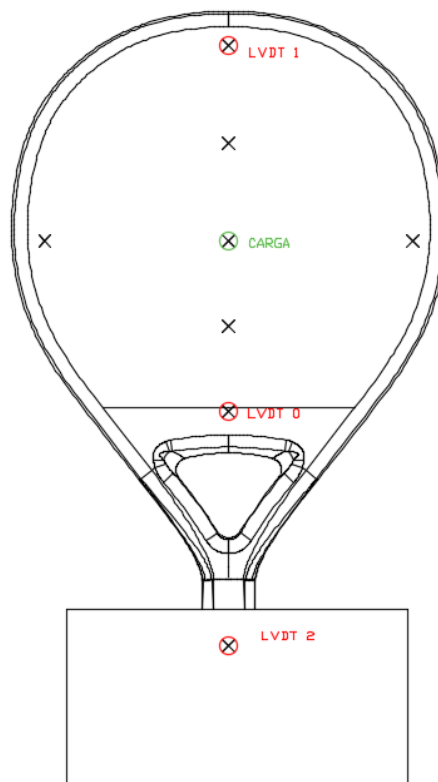


Figura 10.1: Esquema disposición de LVDT y carga FC1

Las **circunferencias verdes**, de aquí en adelante simbolizarán la posición de carga, mientras que las **circunferencias rojas** simbolizarán la posición de medida.

Cabe destacar, que los LVDT han sido sujetos con piezas magnéticas las cuales se han apoyado sobre la propia guía de la máquina de ensayo, mostrada en la Figura 5.2.

A continuación, se detallan las posiciones de medida y la razón de la disposición de cada una de ellas:

- **Posición 1:** Se dispondrán 3 LVDT según se muestran en la Figura 10.1. Se realiza esta medida para caracterizar la rigidez global de la pala. Procedemos a explicar cada uno de ellos:

LVDT 1: Será la medida de referencia (de ahora en adelante será tratado como el punto de referencia), en todas las posiciones, dejaremos este fijo para poder realizar la comparación de los resultados. Además, se sitúa en el límite de aparición de la fibra de carbono, por lo que, no se verá afectado por el fenómeno de deformación local que pueda producirse en la fibra de vidrio debido a la concentración de la fuerza en la zona menos rígida de la pala.

LVDT 0: Se comprobará la alta rigidez del corazón de la pala, debido a que, desde el empotramiento hasta esta localización, encontramos el corazón compuesto por fibra de carbono. Podremos realizar un gráfico de deformación en función de la posición superponiendo los valores obtenidos con la posición 1 y la 3.

LVDT 2: En esta localización, se medirá el desplazamiento del utillaje, si este fuese relevante, deberíamos, a los valores obtenidos con los demás palpadores, restarle esta medida, ya que, de no hacerlo, estaríamos obteniendo resultados de deformación del conjunto pala-utillaje, falseando los resultados.

- **Posición 2:** Se dispondrán 3 LVDT según se muestran en la Figura 10.2. Con este ensayo queremos analizar si al aplicar la carga, existe vuelco lateral de la pala o no. Procedemos a explicar cada uno de ellos:

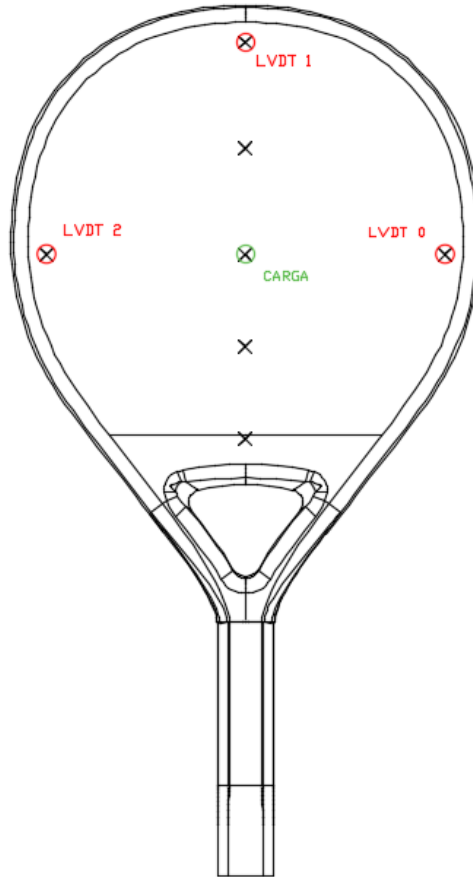


Figura 10.2: Esquema disposición de LVDT y carga FC2

LVDT 1: Como se explica anteriormente, dispondremos siempre que sea posible en esta localización el punto de medida de referencia para poder comparar los ensayos.

LVDT 0 y 2: Con esta disposición de los medidores, queremos analizar el posible vuelco lateral que se genere al aplicar la carga centrada, para ello realizaremos ambas medidas y las restaremos entre sí.

- **Posición 3:** Se dispondrán 3 LVDT según se muestran en la Figura 10.3, con este ensayo junto con la posición 1, queremos caracterizar la deformada longitudinal de la pala en el eje de simetría, superponiendo en un gráfico todos los resultados obtenidos para un mismo régimen de carga. Procedemos a explicar cada uno de ellos:

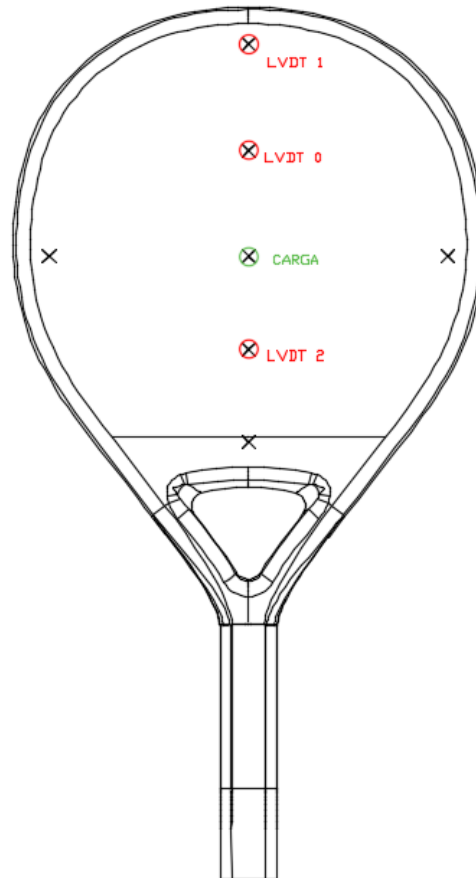


Figura 10.3: Esquema disposición de LVDT y carga FC3

LVDT 1: Como se explica anteriormente, dispondremos siempre que sea posible en esta localización el punto de medida de referencia para poder comparar los ensayos.

LVDT 0 y 2: El objetivo de estas medidas es poder recoger la deformación local producida, realizar un gráfico con la superposición de resultados obtenidos entre la posición 1 y 3, y analizar el comportamiento de la pala. Se deformará localmente debido a la baja rigidez de la fibra de vidrio y la espuma.

1.2.2. Ensayo de torsión

En este ensayo, trataremos de analizar el comportamiento de la pala cuando se carga en un lateral. Se tratará de caracterizar la rigidez torsional de la pala.

Procedemos a la argumentación de las posiciones tomadas para este ensayo:

- **Posición 1:** Se dispondrán 3 LVDT según se muestran en la Figura 10.4. El posicionamiento de estos ha sido de forma lineal, para recoger lo que debería ser un comportamiento de flexión, ya que, al estar en la misma dirección, no deberían verse afectados por fenómenos de giro. Como se ha comentado anteriormente, la localización del medidor 1 servirá para la comparación de resultados.

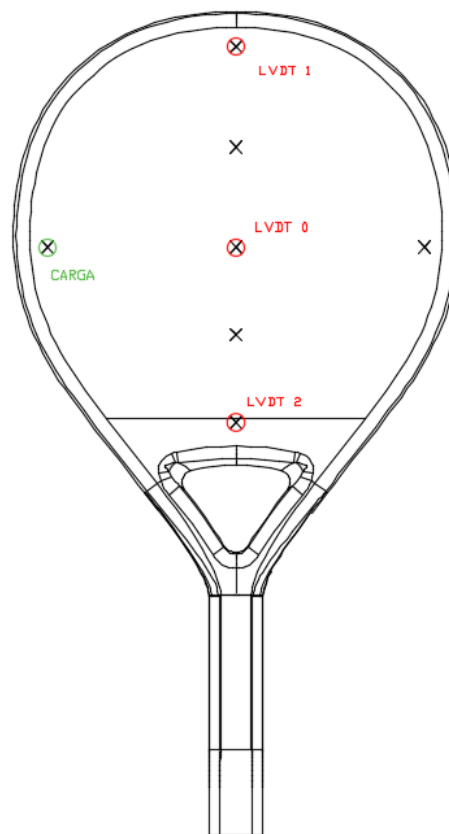


Figura 10.4: Esquema disposición de LVDT y carga TOR-1

- **Posición 2:** Se dispondrán 3 LVDT según se muestran en la Figura 10.5. A continuación, se justifican la localización de los palpadores:

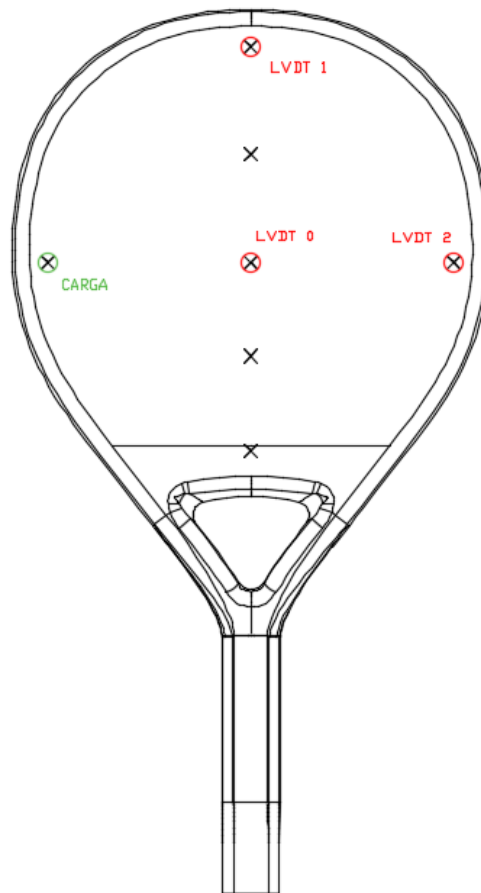


Figura 10.5: Esquema disposición de LVDT y carga TOR-2

LVDT 1: Como se explica anteriormente, dispondremos siempre que sea posible en esta localización el punto de medida de referencia para poder comparar los ensayos.

LVDT 0 y 2: Se dispondrán formando una trayectoria recta con la posición de carga. Se analizará el giro provocado al ejercer una fuerza descentrada.

1.3. Ensayo de flexión con carga aplicada en el extremo

En este ensayo, se trata de caracterizar la rigidez de la pala. En anteriores ensayos, se analizó la repetitividad de los mismos siendo bastante alta, por lo que solo se realizará una posición de medida, tal y como se muestra en la Figura 10.6, donde observamos que el montaje es similar a la posición 1 del ensayo de flexión aplicando la carga en el punto dulce de la pala. Pues, lo que se trata es, de hallar la rigidez sin tener la deformación local, cosa que conseguimos al aplicar la carga cerca de la fibra de carbono.

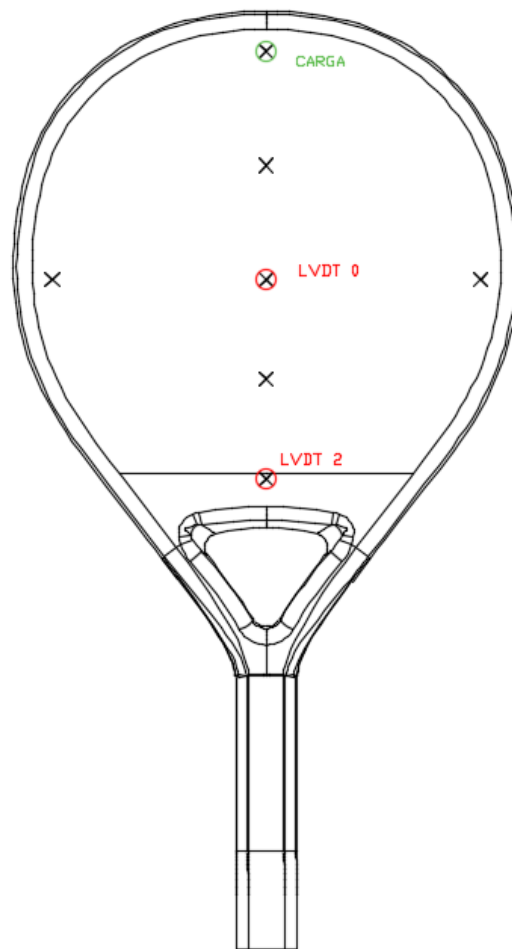


Figura 10.6: Esquema de posición de LVDT y carga, ensayo FE

1.4. Resultados

A continuación, expondremos los resultados más relevantes obtenidos mediante este ensayo. No se mostrarán todos debido a su extensión, para mayor detalle, acudir al apéndice C.

1.4.1. FC - Fuerza centrada

Comenzamos justificando que las medidas tomadas son correctas, se comprueba que el LVDT 2 en la posición de medida 1 permanece fijo durante el ensayo, por lo que, como se muestra en la Figura 10.7, podremos asimilar nuestro utillaje como un empotramiento, por lo que en posteriores ensayos no se realizará dicha medida.

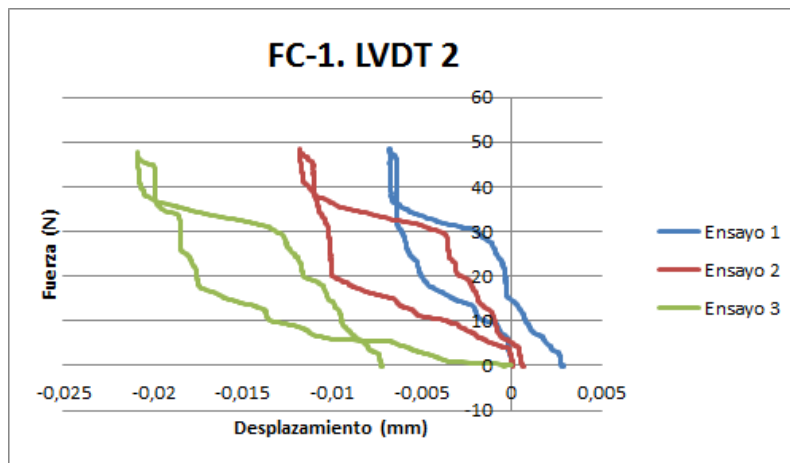


Figura 10.7: Curva fuerza-desplazamiento del ensayo cuasi-estático sobre la pala I-A-FC-1-2.

En las Figuras 10.8 y 10.9, observamos las gráficas de fuerza desplazamiento para 2 caras de las 6 posibles, suficientes para analizar el comportamiento producido.

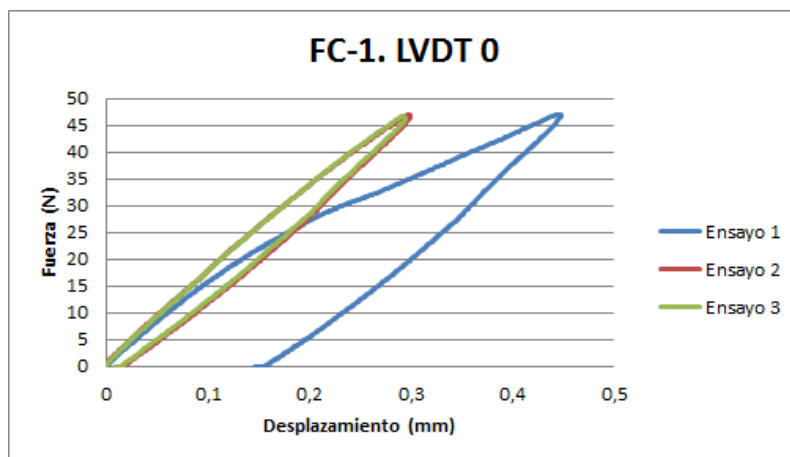


Figura 10.8: Gráfica de ensayo de rigidez pala III-A-FC-1

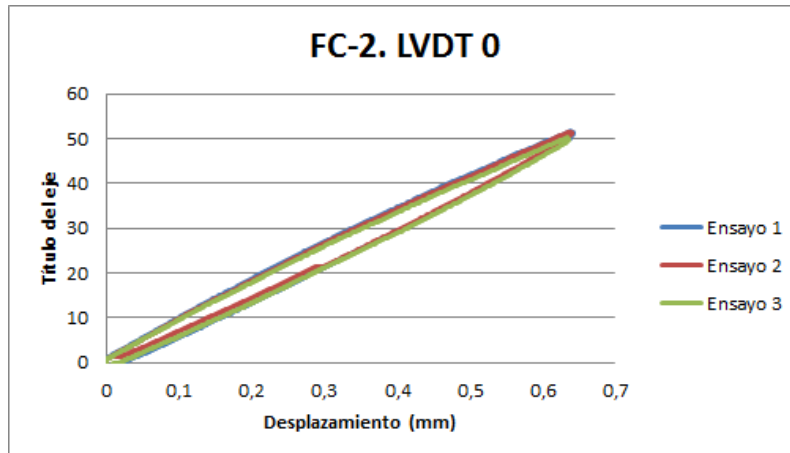


Figura 10.9: Curva de rigidez ensayada sobre la pala II-A-FC-1

En la Figura 10.8, se puede mostrar claramente, como todos nuestros ensayos han demostrado que nuestras palas tienen un ciclo de histéresis mecánica cuando realizamos la carga y descarga cuasiestática. Esto es debido al comportamiento viscoelástico de los materiales, dada la existencia de rozamiento interno, tendremos pérdidas de energía que se traducen en el área encerrada en el ciclo de histéresis, este efecto se ve acentuado especialmente por la presencia de la espuma. Además, observamos como el primer ensayo tiene una gran dispersión respecto a los demás, esto puede ser debido a que durante el primer ensayo se eliminan las posibles holguras del sistema de sujeción y de la máquina. Al realizar los ensayos posteriores vemos como esta dispersión desaparece consiguiendo una gran repetitividad de los ensayos. Tendremos en cuenta esta dispersión producida en la realización de la correlación, eliminando los datos del primer ensayo realizado.

En la Figura 10.9, observamos los ensayos realizados sobre la pala II-A, donde nos hemos encontrado que no existe dispersión entre el primer ensayo y los demás, ha sido la única. Podemos observar una gran repetitividad de los ensayos, así como el ciclo de histéresis siempre presente.

Observamos además, en la Figura 10.10, una gráfica donde realizamos la resta de las medidas obtenidas en el LVDT1 y el LVDT0, con el propósito de analizar el comportamiento propio de la pala, obviando lo que suceda en el empotramiento.

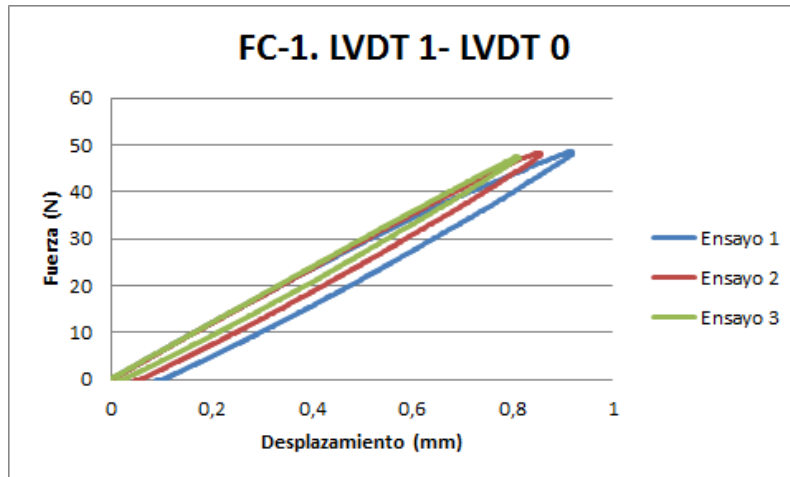


Figura 10.10: Resta de medidas entre LVDT 1 y 0 en I-A-FC-1

A continuación, analizaremos si al aplicar la carga centrada, se produce un vuelco lateral, para ello acudimos a los resultados obtenidos en el ensayo de fuerza centrada en la posición 2. En la Figura 10.11, mostramos la resta de las medidas tomadas por el LVDT 2 y el 0, podemos observar que no sufre giro alguno. La gráfica muestra apenas micras de desplazamiento, producidas por el posible error de posición de la aplicación de la carga y el propio ruido.

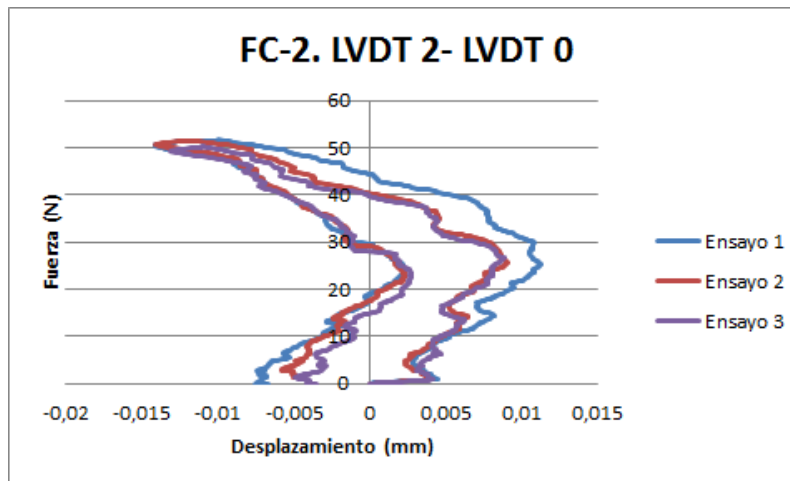


Figura 10.11: Resta de medidas de LVDT 2 y 0 en I-A-FC-2

Por último, uniremos los resultados obtenidos de las posiciones 1 y 3 de fuerza centrada para caracterizar la deformada de nuestra pala en el sentido longitudinal, en el cual la espuma tiene gran influencia según se ha podido comprobar en el modelo estático, no siendo así en el dinámico. Podemos observar la deformada media (con su desviación en forma de barras de error) en la Figura 10.12. Observamos como existe una gran deformación local a causa del bajo módulo de elasticidad de la espuma, será esta deformada la que desearemos reproducir en nuestro modelo cuando realicemos la correlación estática.

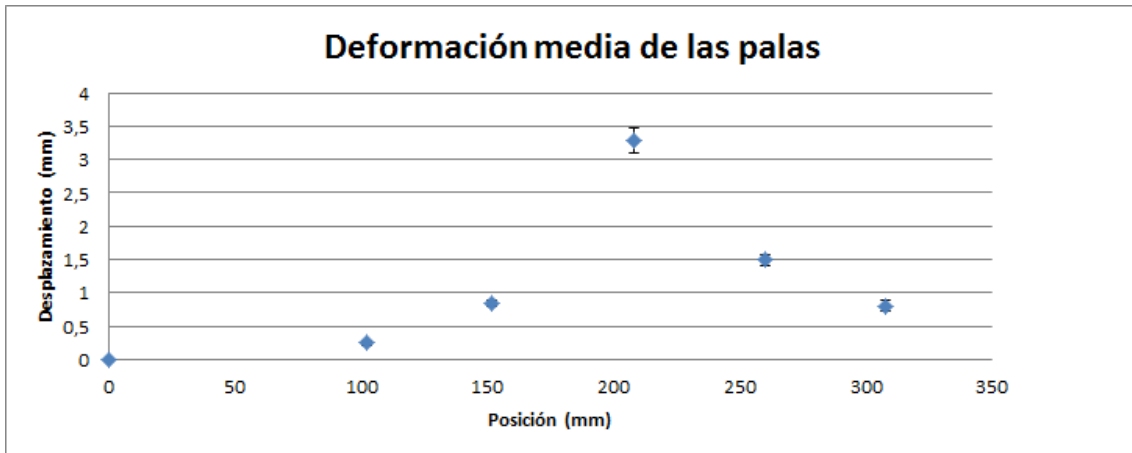


Figura 10.12: Deformada media de las palas estudiadas en los ensayos cuasi-estáticos al aplicar la carga en el centro y medir según las posiciones 1 y 3

Pasamos al análisis de la rigidez global de nuestro modelo. En la Figura 10.13, se muestran todas las medidas en el punto de referencia comentado en anteriores apartados para los ensayos de fuerza centrada. Observamos como claramente, los primeros ensayos están falseando el resultado, por lo que en la futura correlación no los tendremos en cuenta.

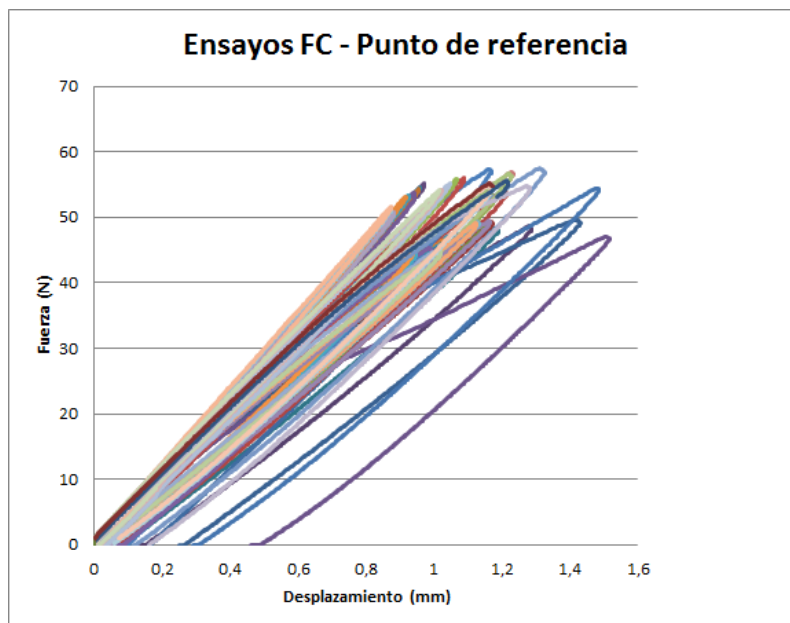


Figura 10.13: Curvas fuerza-desplazamiento tomadas en el punto de referencia (LVDT 1) para todos los ensayos de fuerza centrada sobre todas las dos caras de todas las palas.

Así, pasamos a ver en la Figura 10.14, el rango de rigidez al que debe adecuarse nuestro modelo, obviando las holguras, para considerar un modelo estático válido.

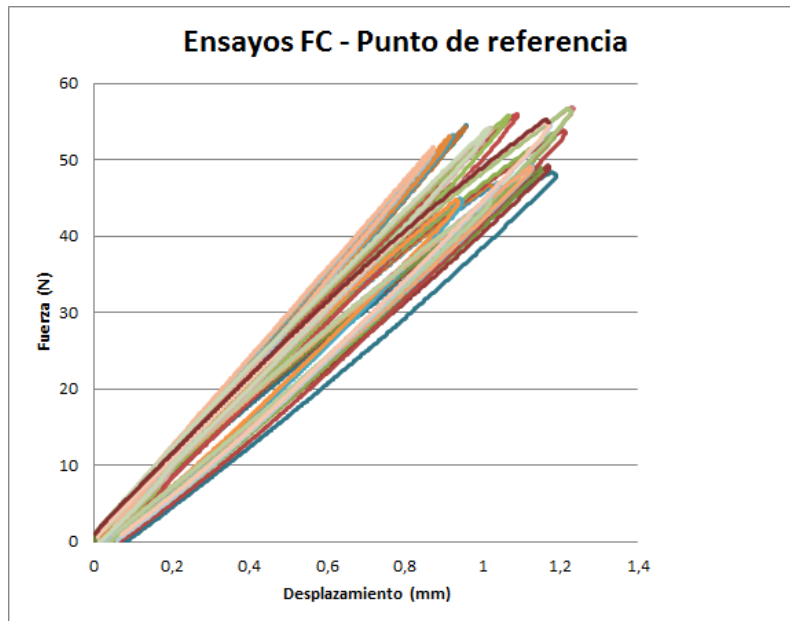


Figura 10.14: Curvas fuerza-desplazamiento tomadas en el punto de referencia (LVDT 1) para las dos caras de todas las palas en el ensayo de fuerza centrada obviando el primer ensayo.

1.4.2. FE - Fuerza en el extremo

Con este ensayo, se analizará la rigidez de la pala al aplicar la carga en el extremo, con el objeto de la realización de la posterior correlación.

Vemos en las Figuras 10.15 y 10.16, las medidas de los LVDT 0 y 2 respectivamente, podemos analizar como ha aumentado la rigidez respecto a las medidas tomadas en el ensayo de flexión centrada, debido a que la carga se realiza en la fibra de carbono, por lo que no tendremos el fenómeno de deformación local que propician tanto la espuma como la fibra de vidrio.

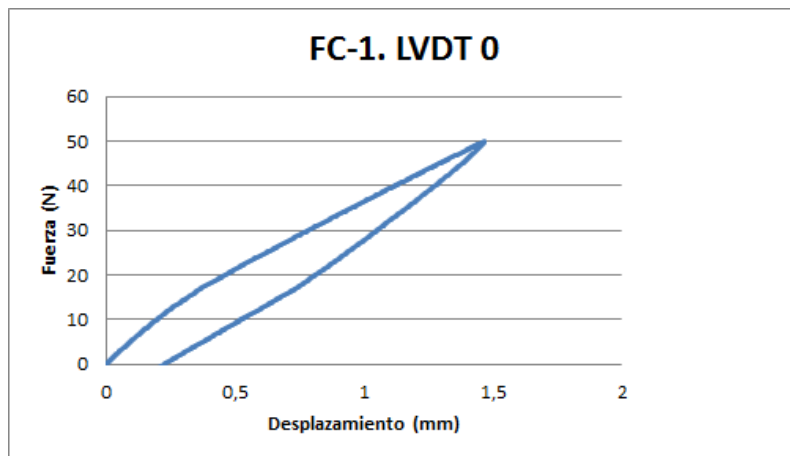


Figura 10.15: Medida LVDT 0 en II-B-FE

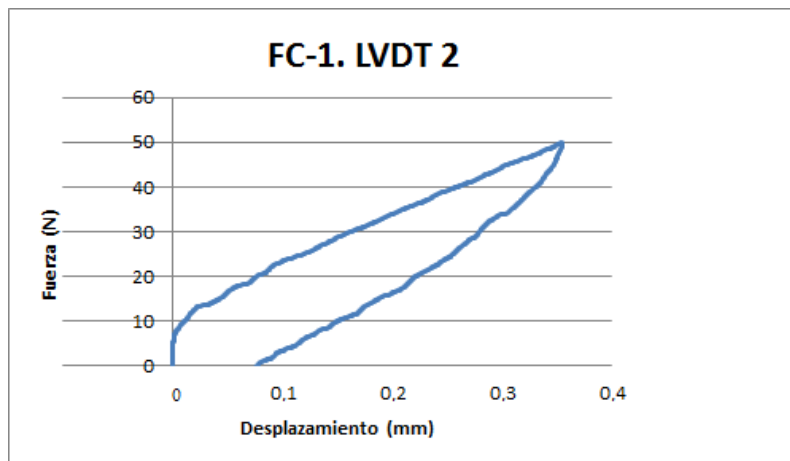


Figura 10.16: Medida LVDT 2 en II-B-FE

1.4.3. TOR - Ensayo de torsión

Con este ensayo, hemos sido capaces de analizar el comportamiento del empotramiento, determinando que permite el giro de la pala, por lo que los resultados obtenidos en este ensayo no podrán ser objeto de la correlación. En la Figura 10.17, observamos como tenemos un desplazamiento residual, ya que el rozamiento producido no es suficiente.

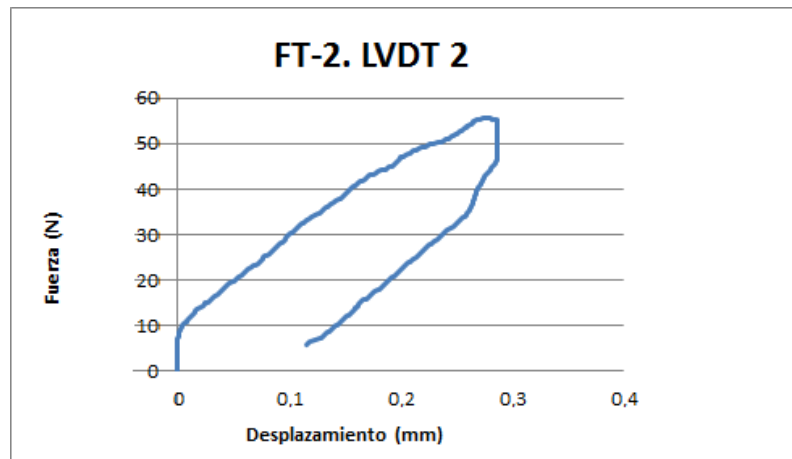


Figura 10.17: Medida I-A-TOR-1-2 justificando la no realización del ensayo de torsión

1.5. Conclusiones obtenidas del ensayo cuasi-estático

Mediante estos ensayos determinamos que el utillaje no es el apropiado para realizar un ensayo de torsión, ya que no ofrece el suficiente rozamiento para asegurar la fijación de la pieza frente a la rotación, observamos en la Figura 10.17, como tenemos un desplazamiento final establecido, debido a que se produce el giro de la pala, no la deformación de la misma. Es por ello por lo que en el presente TFG no se realizará una correlación numérico-experimental con el ensayo de torsión.

Por otro lado, observamos que los resultados obtenidos en los primeros ensayos de cada cara de la pala no son válidos, debido a no linealidades del sistema mecánico de fijación de la pala y de la aplicación de la carga, las cuales quedan eliminadas tras realizar el primer ensayo y los siguientes tasan a la perfección. Por ello estos datos obtenidos en los primeros ensayos no se tendrán en cuenta en la correlación.

Se da por válido el empotramiento realizado con el utillaje para los ensayos de flexión. Tal y como se muestra en la Figura 10.7, apenas podemos diferenciar entre ruido y medida, estamos en el orden de las micras, por lo que consideramos nuestro empotramiento, al menos a bajos niveles de carga, infinitamente rígido en comparación con la rigidez de la pala.

2. Ensayos de impacto

2.1. Configuración del ensayo

Pasamos a la realización de los ensayos de impacto con la máquina *INSTRON CEAST 9350* y con el software *CeasView*. Primero necesitaremos definir un caso para realizar los ensayos. La pestaña principal que se debe modificar se muestra en la Figura 10.18.

Impact Energy	65.743	J	Carriage Mass	1.000	kg
Impact Velocity	4.43	m/s	Applied Mass	5.000	kg
Impact Height	1000.000	mm	Total Mass	6.700	kg
Extension Length	0.000	mm	Support Diameter	20.000	mm
Extension Mass	0.000	kg	Support Type		

Figura 10.18: Pestaña de parámetros iniciales para definición de caso de impacto

Donde:

- **Energía de impacto:** Este parámetro será calculado por el software, ya que se ha decidido realizar un control de posición en lugar de energía, debido a que tenemos un mejor concepto sobre este. Estamos realizando impactos a baja energía, por ello, para no provocar la fractura en nuestras palas, se han realizado ensayos aumentando paulatinamente la energía de impacto, hasta que se ha llegado a una energía de **2.36 J**, este valor será común para todos los ensayos y para nuestro modelo.
- **Velocidad de impacto:** Al igual que la energía de impacto, esta será calculada a partir de los demás parámetros. Nuestro ensayo de 2.36 J, da una velocidad de impacto de **1.42 m/s**.
- **Altura de caída:** Este será nuestro parámetro de control, comenzamos con 30 mm (el mínimo), debido al *TRIGGER* (que será comentado posteriormente), no se obtuvieron resultados, por lo que se realizaron ensayos aumentando la altura de 10 en 10 mm, hasta que hemos llegado al consenso de realizar los ensayos a **100 mm** de altura.
- **Masa:** Este será el último parámetro de interés, para que se puedan bien los cálculos necesarios, será necesario este valor para obtener la energía y velocidad. Nuestro impactador tendrá una masa de **2.41 Kg**.

Una vez hemos configurado nuestro ensayo, configuramos la máquina, se muestra en la Figura 10.19, la pestaña de control que se detallará a continuación.

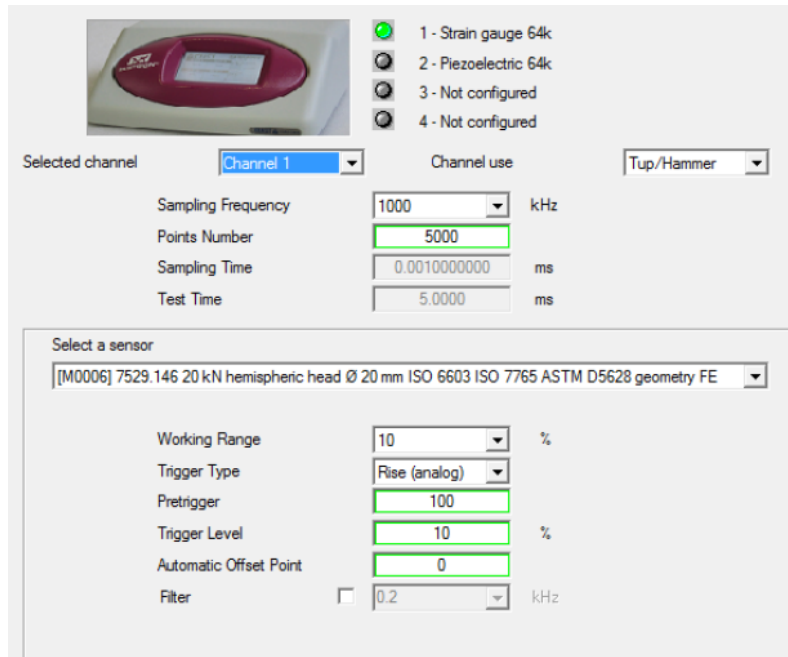


Figura 10.19: Pestaña de control de la máquina de ensayo Ceast 930

Donde:

- **Channel use:** Deberemos seleccionar el uso de canal Tup/Hammer.
- **Frecuencia de muestreo:** Será la frecuencia a la que se obtendrán los datos, debido a que se ha obtenido un tiempo de contacto medio de 28 ms, se decide bajar este valor hasta los **500 kHz**, es decir se tomará un dato cada 2 micro segundos (este valor se mostrará automáticamente en la pestaña tiempo de muestreo).
- **Número de datos:** Una vez seleccionada la frecuencia de muestreo, ya que queremos recoger datos al menos durante 36 ms, se ha establecido un total de **20.000** datos (destacar que el máximo son 64.000). Teniendo un total de **40 ms** de toma de datos (este valor se mostrará automáticamente en la pestaña tiempo de ensayo).
- **Rango de trabajo:** La célula de medida mínima de la que disponemos es de **220 kN**, esta pestaña regulará el porcentaje sobre este valor en el cual se encuentra este ensayo, seleccionaremos el mínimo, 10 %, quedándose en 2.2 kN, aún lejos de nuestros ensayos.
- **Tipo de disparo:** Se refiere al tipo de comienzo de tomado de muestra, seleccionaremos que sea una subida analógica.

- **Predisparo:** Hace referencia a la toma de datos que deseamos que sean guardados antes de realizar el impacto. La máquina esta constantemente tomando datos, pero cuando llena su memoria son eliminados al instante, seleccionando un valor en esta pestaña, impondremos que los datos deseados se queden guardados. Este parámetro es más importante de lo que puede parecer, hemos observado que la máquina realiza medidas en relativo, en ningún momento nosotros le imponemos manualmente el 0 absoluto. El origen máquina lo establece el primer dato guardado (mediante el predisparo), por lo que debemos estar seguros de que en el primer dato guardado, no se ha producido aún el impacto.

- **Nivel de disparo:** “Será el porcentaje sobre el Rango de trabajo, una vez alcancemos este valor, comenzará la toma de datos” (Manual Ceast 9350). Tomamos un valor del 5 % sobre el rango de trabajo, estamos en el entorno de los 110 N.

Pasamos a la pestaña general de *CeastView*, la cual se muestra en la Figura 10.20.

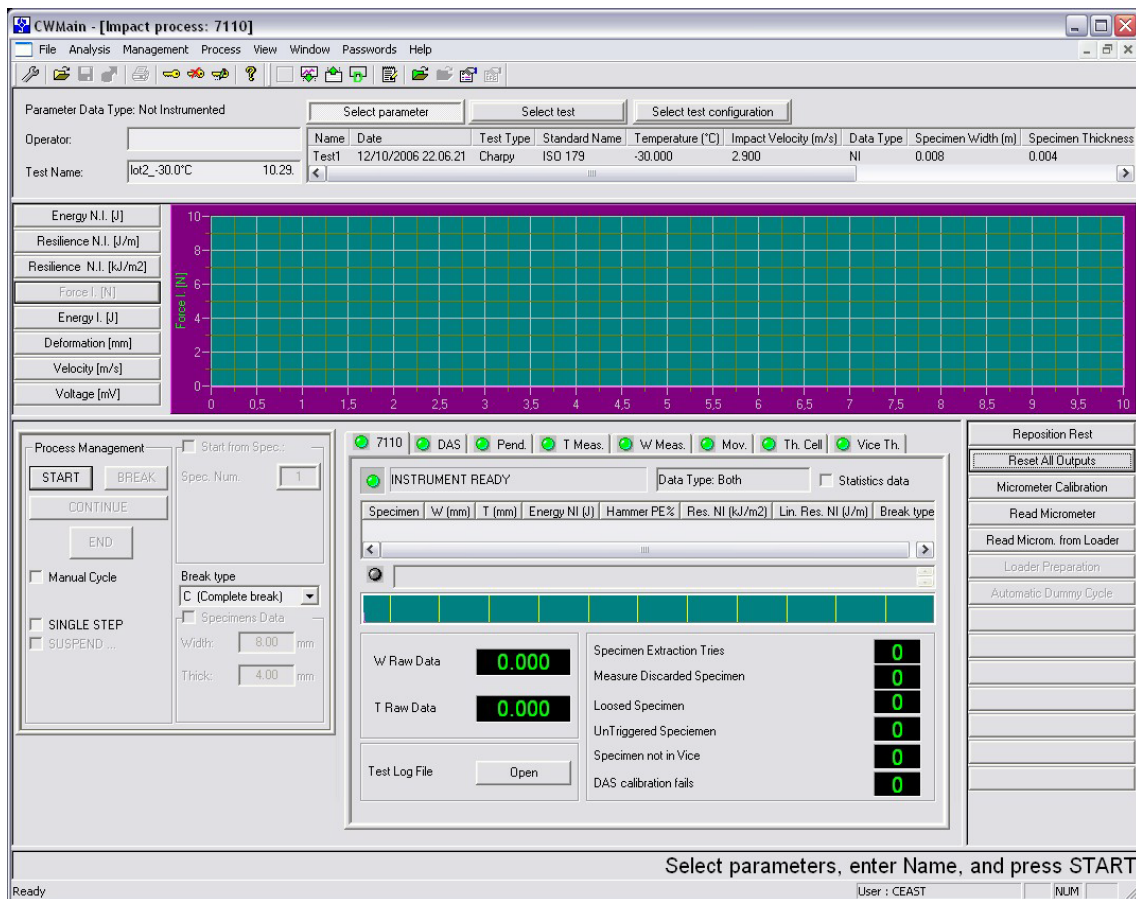


Figura 10.20: Pestaña general de CeastView

Para la realización del ensayo, debemos realizar los siguientes pasos:

1. Operador, en este caso Adrián.
2. Nombre del ensayo, por ejemplo I-A-FI (Pala 1, cara A, ensayo de impacto).
3. Seleccionamos el caso (*select parameters*) que hayamos definido previamente.
4. Con PCMaster, comprobamos el origen máquina.
5. Pulsamos el botón *START*.
6. El propio software nos dará un aviso de la disposición a la que debe estar el sensor, comprobamos y en caso de no estar, modificamos su situación.
7. Si todo ha ido bien, podremos darle a continuar y veremos la pestaña de introducción de datos, que es similar a la mostrada en 10.18, así, seguidamente podemos realizar varios ensayos de distinta energía.
8. Damos a *OK* y la máquina realizará un aviso acústico, 3 pitidos agudos para avisar de la preparación del ensayo, posteriormente se deja caer el impactador y en pantalla se visualizarán los resultados.
9. Como último paso, *File, Export test case* y seleccionamos en formato Excel.

Vemos en la Figura 10.21, observamos una imagen extraída de un vídeo grabado a cámara lenta del ensayo de impacto en la máquina Ceast 9350.

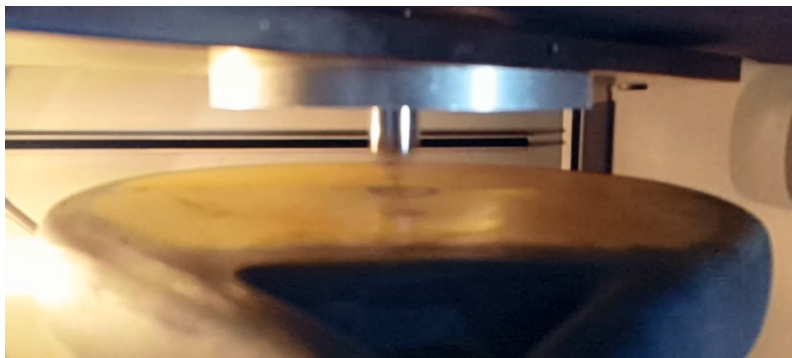


Figura 10.21: Foto extraída de vídeo a cámara lenta en Ceast 9350

2.2. Resultados

Pasamos a la exposición y argumentación de resultados obtenidos en el ensayo de impacto en la máquina *INSTRON CEAST 9350*.

En la Figura 10.22, se muestra la repetitividad obtenida en este ensayo, concretamente sobre la pala II-B. Observamos como las curvas son coincidentes, esto se da para todas las palas.

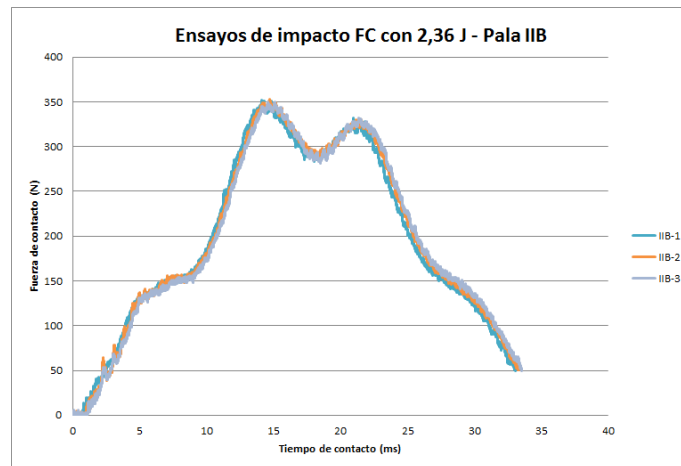


Figura 10.22: Fuerza de contacto obtenida en un impacto de 2.36 J en la pala II-B

Antes de comentar los fenómenos que se están produciendo, pasamos a la superposición de todas las gráficas obtenidas en el ensayo para todas las palas en la Figura 10.23. Es necesario comentar que no se ha conseguido exportar los últimos 50 N de las curvas obtenidas, pese a ello, se observa claramente la tendencia de estos últimos ms de contacto.

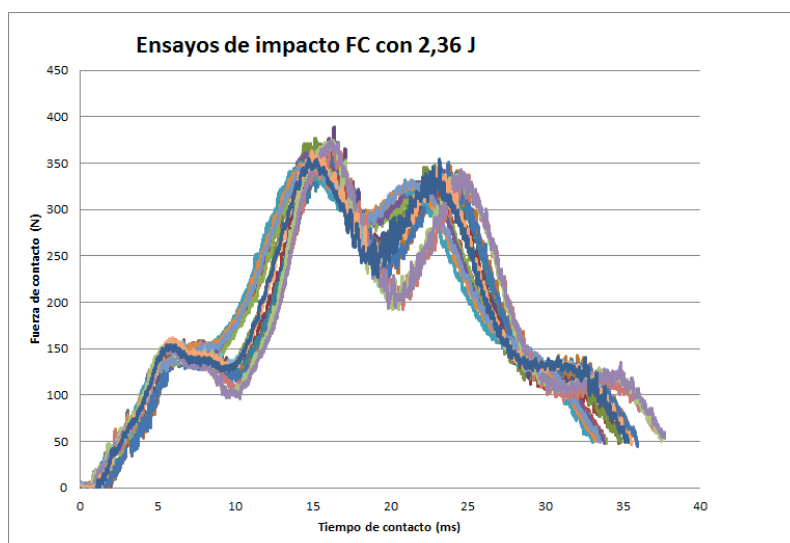


Figura 10.23: Superposición de las gráficas obtenidas para todas las palas en el ensayo de impacto

Observamos en la Figura 10.23 el rango de resultados que deberemos obtener en nuestro modelo en elementos finitos. También podemos observar la simetría de la gráfica, lo que se traduce en pequeña degradación y absorción de energía.

Como se muestran en las gráficas de la Figura 10.23, no se produce un único impacto, en los vídeos generados en el modelo en elementos finitos hemos podido observar el proceso siguiente:

1. El impactador lleva una velocidad inicial, impacta con la pala en el punto deseado y esta adquiere el movimiento descendente avanzando más rápido que el impactador. Se produce una fuerza de contacto del orden de los 150 N.
2. La pala tiende a frenarse, y el impactador sigue en movimiento descendente, por lo que se produce el segundo impacto, donde se generan los mayores valores de fuerza de impacto junto con el tercero. Se produce una fuerza de contacto del orden de los 350 N.
3. El impactador llega a velocidad 0 en contacto con la pala, esta tiende a volver a su posición inicial y se realiza el mismo procedimiento de forma inversa, la pala devuelve un primer impacto, el impactador aumenta la velocidad. Se produce una fuerza de contacto del orden de los 340N.
4. La pala vuelve a alcanzar al impactador al final del proceso y se da otro pequeño golpe. Se produce una fuerza de contacto del orden de 140 N.

CeasView también nos proporciona la energía en el proceso, velocidad y desplazamientos. Esta información la obtiene a través de la integración de la fuerza como se ha comentado anteriormente. Comenzamos observando la energía absorbida en el proceso en la Figura 10.24. Vemos como se produce un descenso entre el pico de energía máximo y el final del proceso. Esta diferencia es la absorción de energía de la pala, la cual se ha calculado de un valor de $1,2 \pm 0,2J$ absorbiéndose un total del 58 % de la energía puesta en juego. Observamos además, cómo los el valor teórico de impacto (2.36 J) no corresponde con el máximo de la Figura 10.24, como se ha detallado en el procedimiento de cálculo, este error viene dado de la medida inicial de la fuerza, que acarrea un error en los sucesivos cálculos, obteniendo una incertidumbre en los valores de energía obtenidos del 18 %.

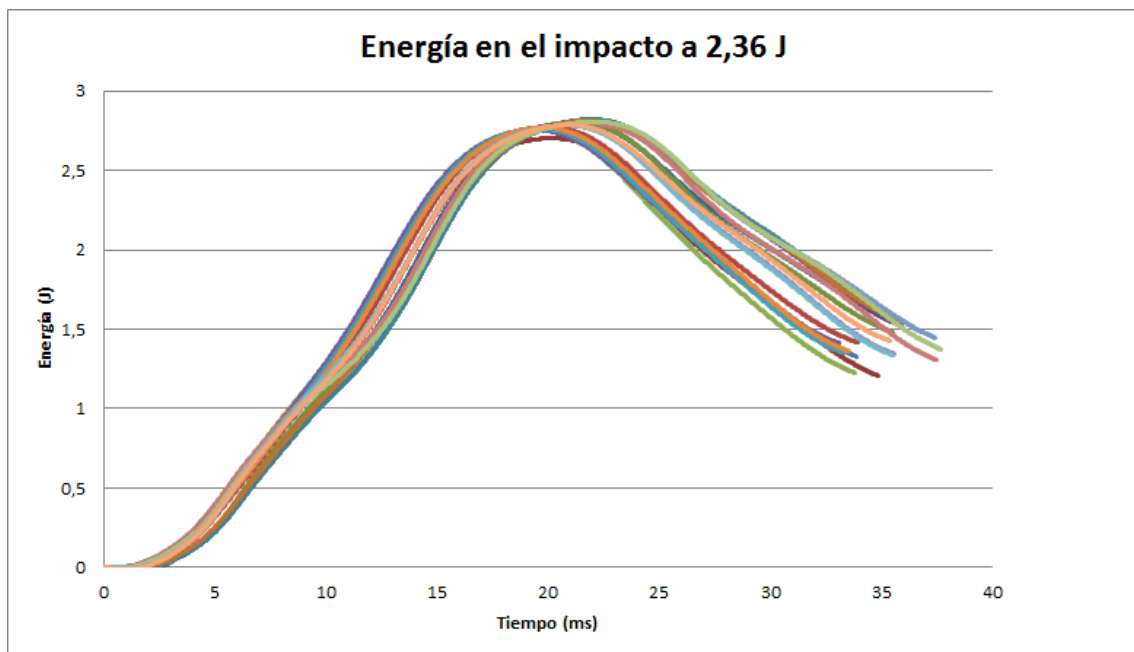
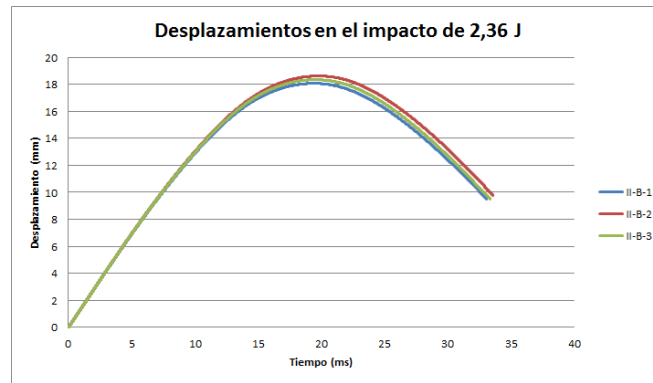
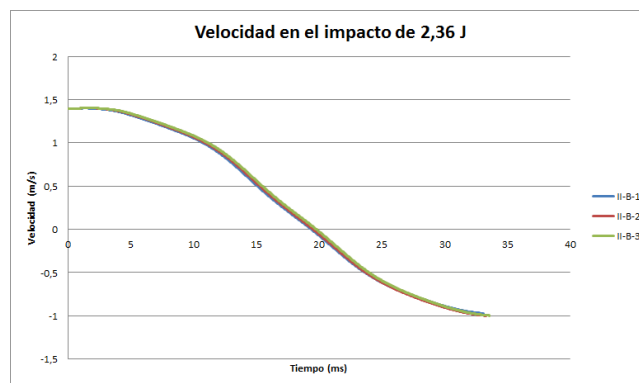


Figura 10.24: Absorción de la energía puesta en juego en el ensayo de impacto de 2.36 J en las dos caras de todas las palas

Pasamos a analizar los desplazamientos y velocidades generadas en el ensayo en la Figura 10.25. Observamos el carácter simétrico del ensayo, pese a tener el error de medida anteriormente comentado y no poder visualizar en su totalidad el ensayo. Se observa también que, en todos los resultados obtenidos, la gran repetitividad del ensayo.



(a) Desplazamientos producidos en el ensayo de impacto



(b) Velocidad producida en el ensayo de impacto

Figura 10.25: Ensayo de impacto de 2.36 J realizado sobre la pala II-B

A modo resumen, se muestra en la Figura 10.26 las fuerzas máximas obtenidas en cada pala con su desviación correspondiente. A pesar de que apreciamos claramente la forma de la gráfica, también se observa el ruido, lo que justifica la desviación generada en la fuerza máxima. Observamos que entre palas existen diferencias, pero todas ellas están en valores cercanos a los 360 N.

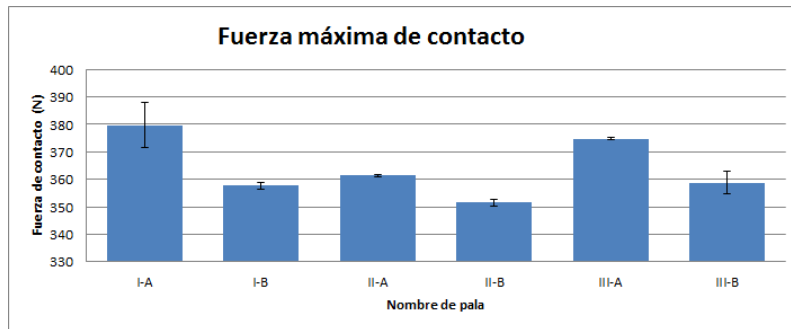


Figura 10.26: Comparación de la fuerza máxima obtenida en el ensayo de impacto para cada una de las caras de todas las palas.

Por último, en la Figura 10.27, observamos el tiempo de contacto en el impacto de las dos caras de todas las palas. Al igual que en la fuerza de contacto, observamos variaciones entre las palas, pero todas ellas tienen un tiempo de contacto cercano a los 35 ms.

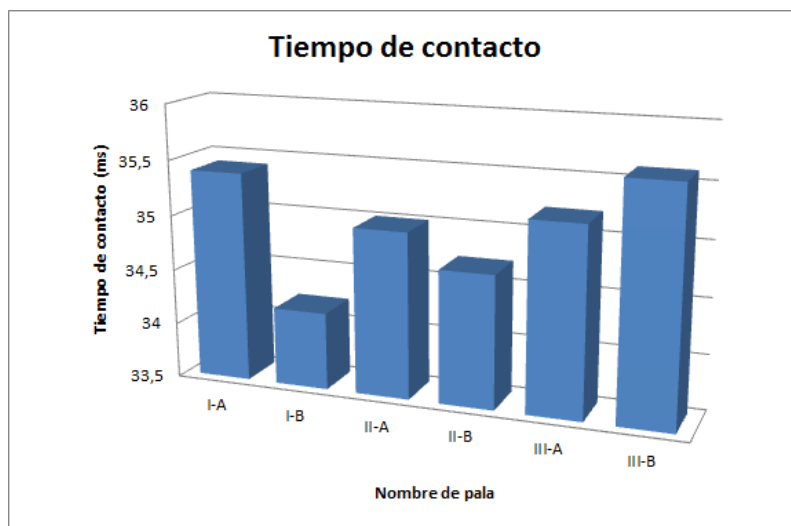


Figura 10.27: Comparación del tiempo de contacto producido en el impacto para las dos caras de todas las palas.

2.3. Conclusiones obtenidas del ensayo dinámico

Se ha analizado las medidas tomadas con nuestra máquina *INSTRON Ceast 9350*, determinando como un parámetro clave el predisparo o *pretrigger*, determinará el origen máquina de medida, por lo que debemos estar seguros de que toma como 0 el momento en el que aún no hay contacto..

En cuanto a los resultados, observamos una gran simetría en los ensayos realizados, por lo que no se produce degradación en la pala. Podemos ver también que tenemos una gran repetitividad de los ensayos realizados.

Se produce una absorción de energía debido al comportamiento viscoelástico de los materiales (principalmente de la espuma). Este aspecto no podrá ser reproducido en el modelo en elementos finitos, ya que se ha considerado un carácter lineal.

Tenemos como máximo de fuerza de contacto $360 \pm 15N$, y el tiempo de contacto de $35 \pm 2ms$. Alcanzando desplazamientos en la zona de impacto de hasta 20 mm.

Finalmente, determinamos que se comete cierto error de medida, debido a que estamos trabajando a un 1.5 % del total de la máquina, estando esta calibrada a partir del 10 %. Podemos observar claramente este fenómeno en la Figura 10.24, donde para un impacto de 2.36 J, estamos obteniendo energía absorbida por valor de 2.78 J, teniendo una incertidumbre del 18 %. Concluimos estableciendo como válido el valor de 2.36 J debido a que este es el valor inicial que nos da la máquina (el teórico), cuyo procedimiento es, primero calcular la velocidad inicial con el sensor óptico y posteriormente con la masa, calcular la energía cinética como $E = 1/2 \cdot m \cdot v^2$, dado que la masa es un escalar que introducimos como dato, y la velocidad asumimos que tiene una gran precisión de medida no consideramos error alguno en este valor. Sin embargo las gráficas que muestra como resultados *CeastView*, las obtiene mediante los procedimientos de cálculos mostrados con anterioridad en los que, si cometemos un error de medida en la fuerza, se traducirá tanto a la energía como a la velocidad y desplazamiento.

Capítulo 11

Correlación numérico-experimental

Este capítulo tiene como objeto la comparación de nuestro modelo numérico con los resultados obtenidos en los ensayos, con el fin de dar validez al modelo realizado.

1. Modelo estático

Se compararán los ensayos distintos ensayos realizados de flexión con los resultados obtenidos en el modelo. Como se ha comentado anteriormente, al no ser válido el empotramiento, no podremos analizar la rigidez torsional.

A continuación se detallar el procedimiento realizado para la correlación:

1. Superpondremos todas las gráficas (solo de carga) obtenidas del punto de medida de estudio.
2. Eliminamos los ensayos número 1.
3. Establecemos los límites máximos y mínimos de rigidez obtenidos.
4. Superponemos los resultados obtenidos en el modelo en elementos finitos.

1.1. Ensayos de fuerza centrada

Posición 1

Comenzamos realizando la correlación de rigidez del ensayo de fuerza centrada y nuestro modelo estático en la posición de medida 1.

Se muestra en la Figura 11.1, como nuestro modelo se amolda entre los límites máximos y mínimos obtenidos en los ensayos realizados midiendo en el LVDT 1, dando por válido la caracterización global. Analizaremos la influencia global del módulo de elasticidad de la espuma en la Figura 11.2.

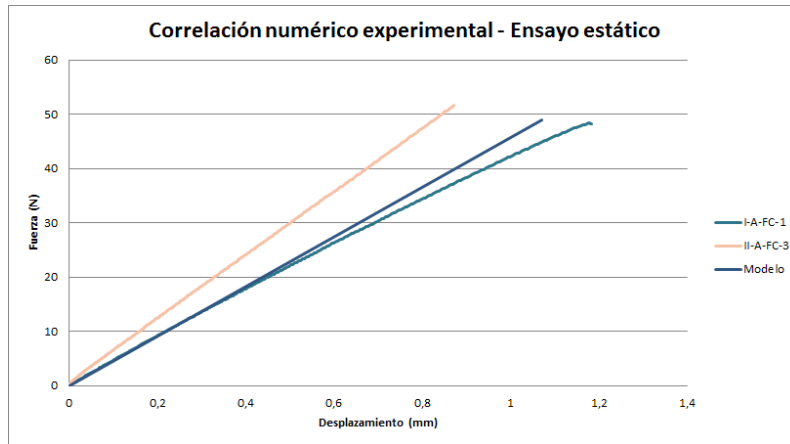


Figura 11.1: Correlación numérico-experimental del ensayo estático de fuerza centrada con $E = 0.4$ MPa, midiendo desplazamientos en el LVDT 1

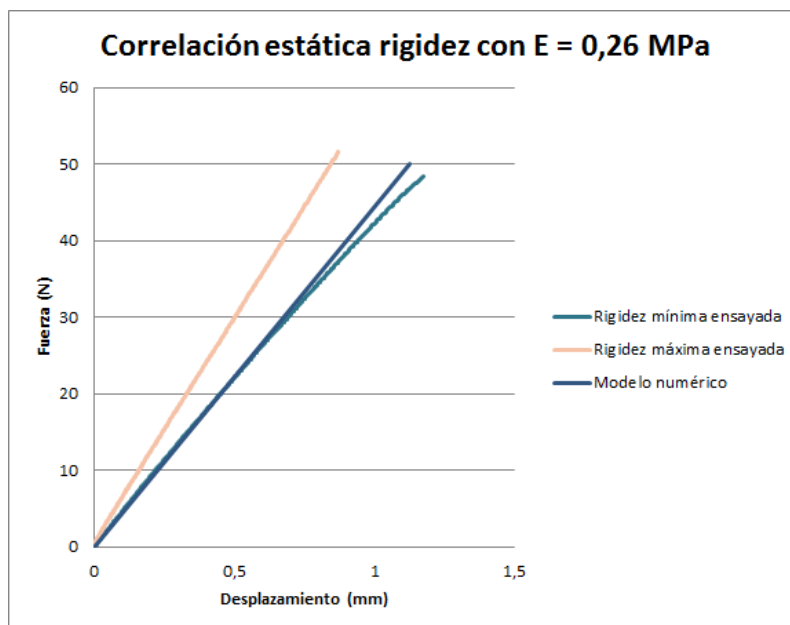


Figura 11.2: Correlación numérico-experimental del ensayo estático de fuerza centrada con $E = 0.26$ MPa, midiendo desplazamientos en el LVDT 1

Podemos observar en las Figuras 11.1 y 11.2 como, globalmente, no tiene gran influencia el módulo de elasticidad de la espuma, esto tiene sentido debido a que, aunque variemos al doble el módulo de elasticidad de la espuma, va a seguir siendo mucho menor que los valores de la fibra de carbono o la fibra de vidrio.

Pasamos a la comparación de resultados en el corazón de la pala, la parte más rígida. Para ello tomamos las medidas del LVDT 0 del ensayo de fuerza centrada en la posición 1. Observamos en la Figura 11.3, como nuestro modelo se amolda a los límites establecidos por las curvas de rigidez máxima y mínima obtenidas en los ensayos. De nuevo en este apartado se han obviado los ensayos número 1 de cada cara.

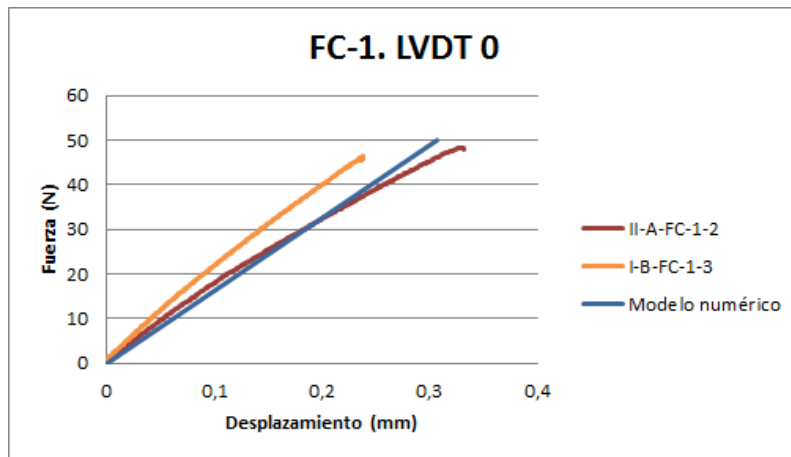


Figura 11.3: Correlación numérico-experimental del punto medido por el LVDT 0 en la posición uno del ensayo de fuerza centrada.

Finalmente en este ensayo, trataremos de analizar si hemos modelizado bien la pala mediante la medida del LVDT 1 menos el LVDT 0, obviando lo que sucede en el empotramiento, obteniendo así valores que únicamente dependen de la pala. Vemos en la Figura 11.4, como nuestro modelo se aproxima a la realidad, estando este los límites máximos y mínimos establecidos por las curvas de rigidez del ensayo.

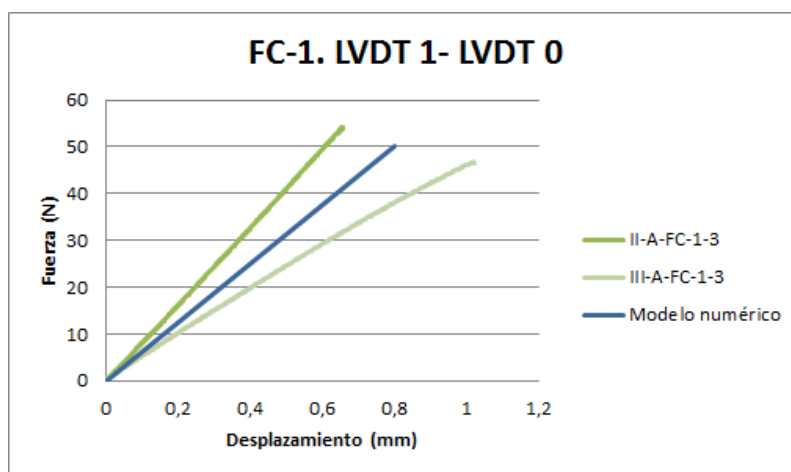


Figura 11.4: Correlación numérico-experimental de la resta de las medidas de LVDT 1 y LVDT 0 en el ensayo de flexión centrada en la posición 1.

Posición 2

En esta posición de medida, compararemos únicamente los resultados obtenidos en uno de los laterales de la pala, ya que, al ser simétrico el modelo en elementos finitos, obtendremos el mismo resultado en ambas medidas, por lo que no será necesario analizar la correlación del LVDT 2 menos el LVDT 0, puesto que obtendríamos un valor nulo.

En la Figura 11.5, observamos que nuestro modelo numérico se adapta a la realidad, limitada por los valores máximos y mínimos que nos otorgan las medidas del propio ensayo.

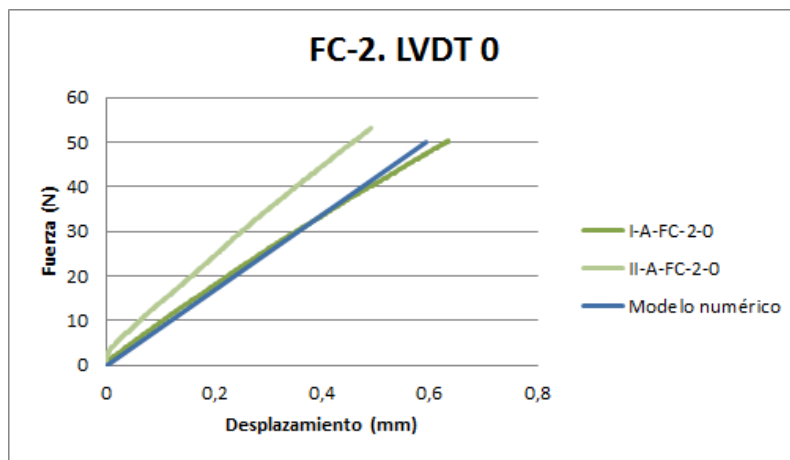


Figura 11.5: Correlación numérico-experimental de la medida del LVDT 0 en el ensayo de flexión centrada en la posición 2.

Posición 3

En esta posición, será interesante comparar los desplazamientos producidos más que la propia rigidez, ya que esta está suficientemente caracterizada con las dos posiciones de medida anteriores.

Pasamos al análisis de la deformada del modelo completo. Observamos en la Figura 11.6, la correlación realizada con un módulo de elasticidad de 0.4 MPa, observamos que tenemos un modelo excesivamente rígido, mientras que en la Figura 11.7, tras realizar el análisis de influencia del módulo de elasticidad en la deformado, determinamos que nuestro modelo se adaptaría a la perfección a la realidad con un módulo de elasticidad de 0.26 MPa.

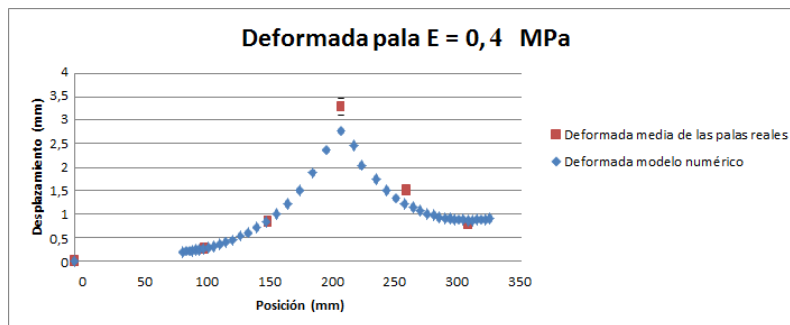


Figura 11.6: Comparación de la deformada del modelo numérico y la experimental de la pala con $E = 0.4$ MPa

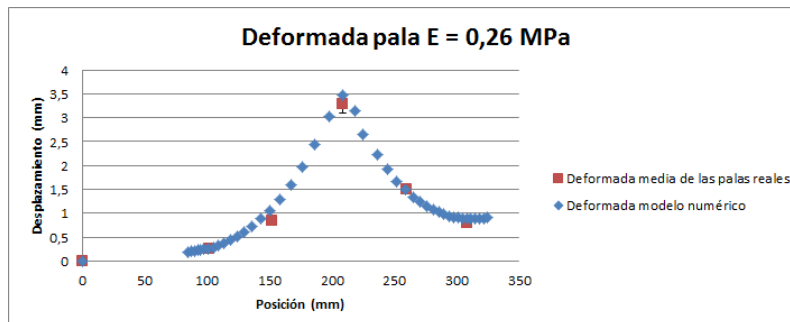


Figura 11.7: Comparación de la deformada del modelo numérico y la experimental de la pala con $E = 0.26$ MPa

A diferencia de en los análisis de rigidez global realizados anteriormente, observamos como la capacidad de deformación de la zona de aplicación de carga se ve altamente afectada por sus propiedades. Observamos aquí la importancia de una futura línea de investigación para la caracterización de la espuma.

1.2. Ensayos de fuerza aplicada en el extremo

En este apartado mediante la Figura 11.8, analizaremos la correlación realizada en el ensayo de fuerza aplicada en el extremo mientras medimos en el centro de la pala.

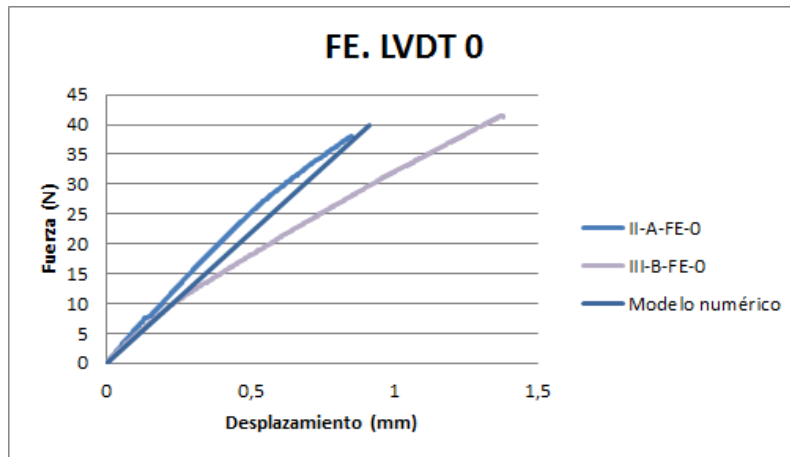


Figura 11.8: Correlación numérico-experimental entre el ensayo de fuerza aplicada en el extremo con resultados del LVDT 0 y el modelo numérico.

Observamos en la Figura 11.8 como la correlación se adapta a los límites establecidos pero podemos observar que si aumentásemos la carga, dejaríamos de estar en lo cierto. Esto puede ser debido a la realización de un único ensayo sobre la pala en el ensayo de flexión en el extremo, que las holguras producidas anteriormente estén volviendo a aparecer o bien por la aplicación de la carga en la zona con fibra de carbono, donde no se realiza una transición de carga tan suave como en la fibra de vidrio.

2. Modelo dinámico

Una vez comprobamos en el anterior apartado, que la caracterización de los materiales es correcta, podemos pasar al modelo dinámico, ya que este tendrá una mayor incertidumbre.

En la Figura 11.9, mostramos los resultados obtenidos mediante los ensayos realizados (escala de grises) y resaltado los resultados de nuestro modelo numérico (color rojo). Podemos observar que hemos caracterizado de forma muy aproximada el comportamiento de nuestra pala de pádel, recogiendo los 4 impactos que se producen en la realidad, así como el orden de la fuerza de contacto (en el entorno de los 360 N la fuerza máxima) y el tiempo de contacto (en el entorno de los 34 ms).

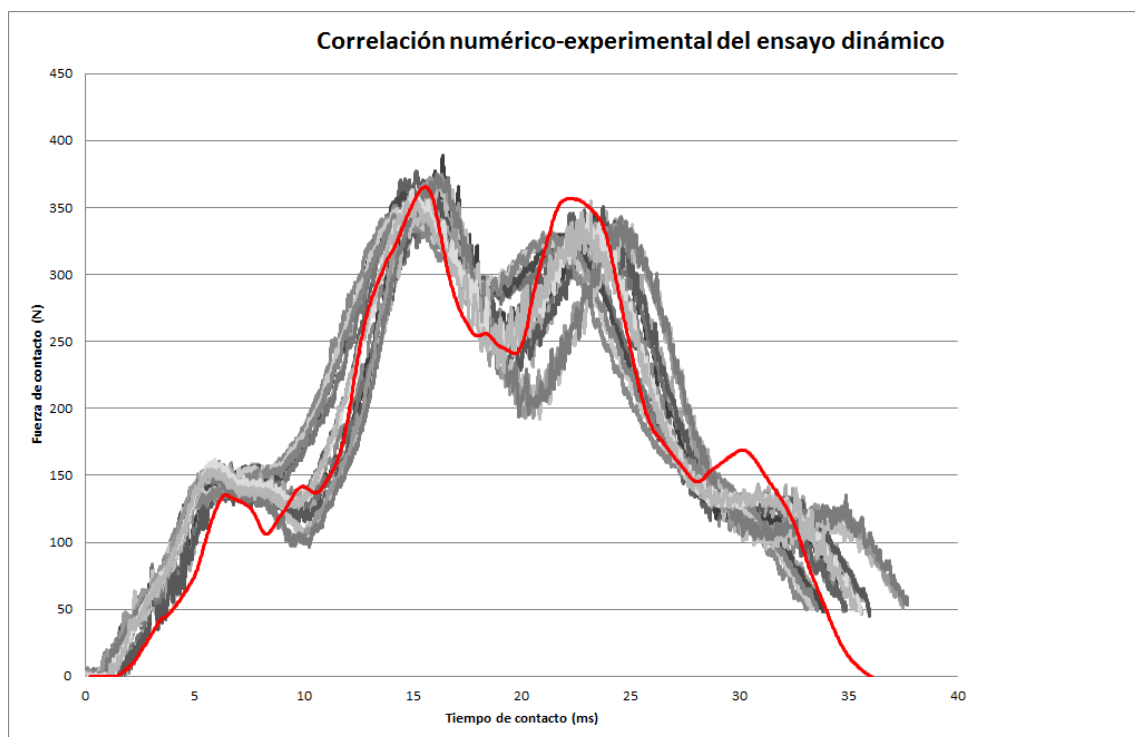


Figura 11.9: Correlación numérico-experimental del ensayo de impacto de 2.36 J sobre la pala de pádel Marvel

Podemos observar en la Figura 11.9, como el primer impacto se realiza dentro de los márgenes de los resultados del ensayo, alcanzando un valor de 134 N. En el segundo impacto alcanzamos los 364 N, logrando adaptarnos al segundo impacto del ensayo. En cuanto al tercer impacto comenzamos a tener diferencias debido a que en nuestro modelo no se ha considerado ningún tipo de degradación, por lo que no se producirá una absorción de energía. Además, debido a que simulamos el impacto con una pelota libre, al rebotar no sigue la misma trayectoria vertical, si no que adquiere una cierta componente horizontal, es por ello por lo que no obtenemos una gráfica perfectamente simétrica, obteniendo un tercer impacto de 356 N superior a lo ensayado. Por este mismo motivo, el cuarto impacto será a mayor carga (172 N) habiendo una diferencia de 40 N con el modelo experimental.

Debido a las variaciones de la fuerza máxima y el tiempo de contacto observados en los análisis de resultados del ensayo de impacto, comparamos los valores obtenidos de todas las palas y el de nuestro modelo en elementos finitos.

En primer lugar, comenzamos con la Figura 11.10, donde podemos observar que nuestro modelo con 364 N de fuerza de contacto máxima, está dentro del rango de valores medios obtenidos en los ensayos.

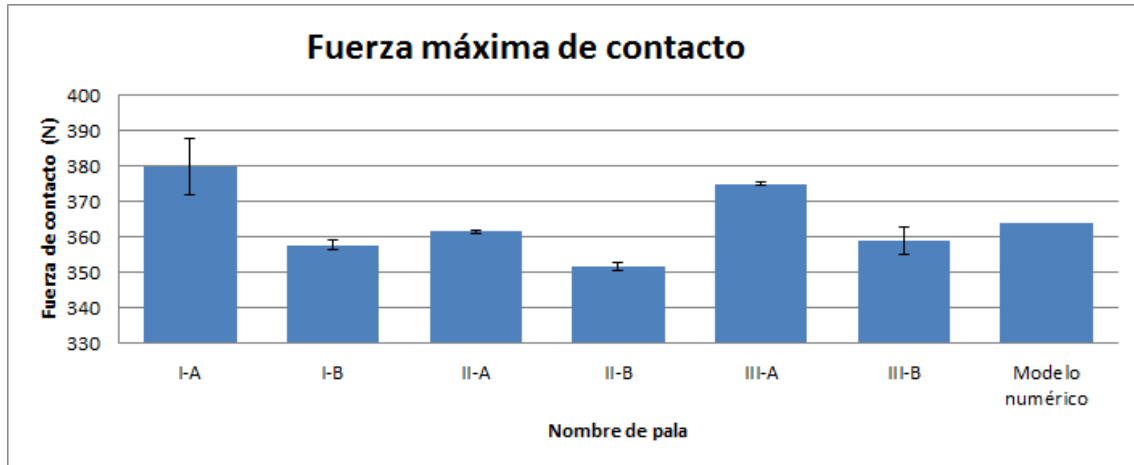


Figura 11.10: Correlación numérico-experimental de la fuerza máxima de contacto producida entre cada cara de todas las palas y el modelo en elementos finitos.

Analizamos el tiempo de contacto en la Figura 11.11, donde observamos que nuestro modelo con 34.7 ms, se encuentra en la franja de valores medios obtenidos en los ensayos, por lo que afirmamos que se ha conseguido una buena modelización del impacto.

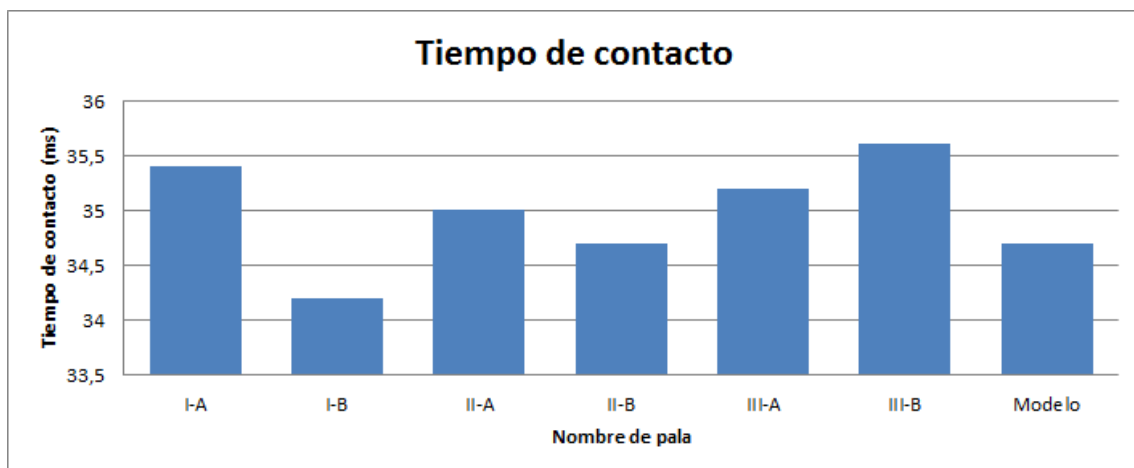


Figura 11.11: Correlación numérico-experimental del tiempo de contacto producido entre cada cara de todas las palas y el modelo en elementos finitos.

3. Extensión de nuestro modelo numérico a otros modelos de Pala

En este apartado, se expondrán los resultados obtenidos al cambiar la configuración de pieles de la pala con el objetivo de reproducir el comportamiento de otros modelos que se recogen en el apéndice F, posteriormente se realizará un análisis de los resultados obtenidos tratando de traducirlos al ámbito del pádel.

3.1. Pala Marvel SPAIN F300

Es la pala que se ha ensayado durante todo el TFG, por lo que ya sabemos que la composición de las pieles de golpeo serán 3 capas de *fibra de vidrio*. Caracterizada por *Shark Pádel* como Potencia = 90 y Control = 70, siendo de gama media-alta.

En la Figura 11.12, se muestra el comportamiento a impacto de 2.36 J de la pala Marvel, mostrándose los ya comentados 374 N de fuerza de contacto y los 34.7 ms de tiempo de contacto.

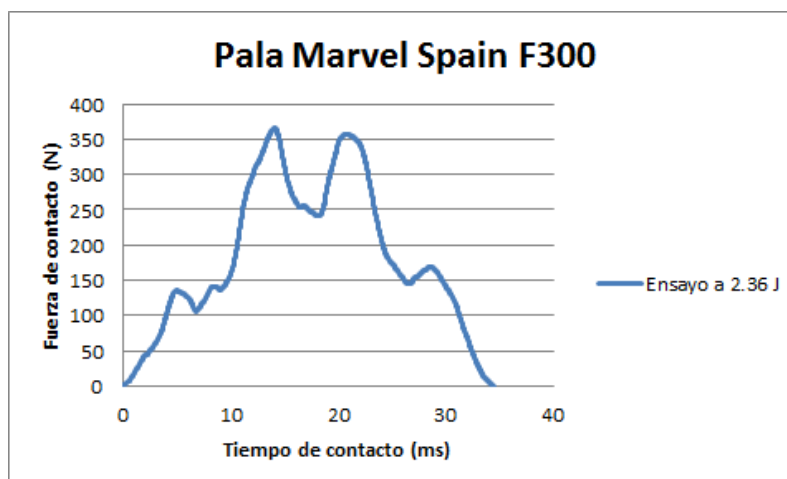


Figura 11.12: Comportamiento a impacto de la pala Marvel Spain F300

3.2. Pala Green Spain M300

Esta pala tendrá las pieles de la zona de impacto constituidas por 2 capas de *fibra de vidrio* y una de *fibra de carbono*. Caracterizada por *Shark Pádel* como Potencia = 85 y Control = 85, siendo de gama alta. En la Figura 11.13, observamos el aumento de rigidez de la pala, se ha aumentado hasta los 399 N de fuerza de contacto máxima y se ha reducido a 33.9 ms el tiempo de contacto.

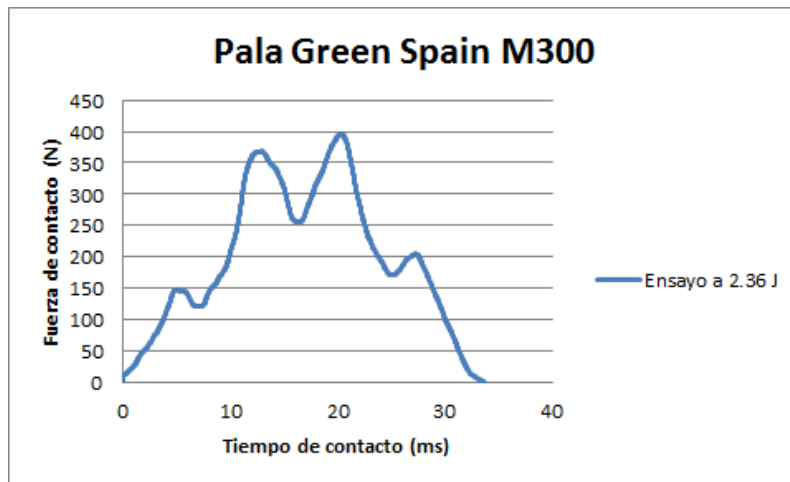


Figura 11.13: Comportamiento a impacto de la pala Green Spain M300

3.3. Pala Wasp Spain WT300

Esta pala tendrá las pieles de la zona de impacto constituidas por 3 capas de *fibra de carbono*, será la más rígida. Caracterizada por *Shark Pádel* como Potencia = 90 y Control = 95, siendo de gama alta. En la Figura 11.14, observamos el aumento de rigidez, obteniendo una fuerza de contacto máxima de 433 N y una reducción del tiempo de contacto hasta los 31.8 ms.

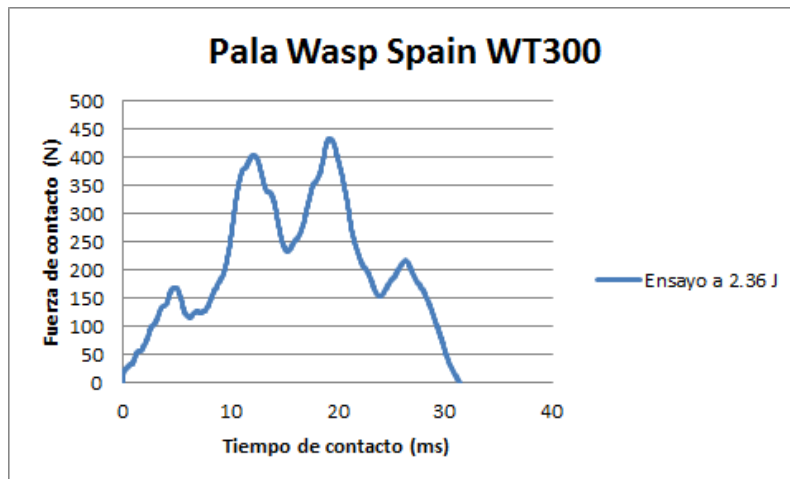


Figura 11.14: Comportamiento a impacto de la pala Wasp Spain WT300

3.4. Comparación y análisis entre distintas palas

Procedemos al análisis de resultados de las diferencias observadas entre las palas en la Figura 11.15.

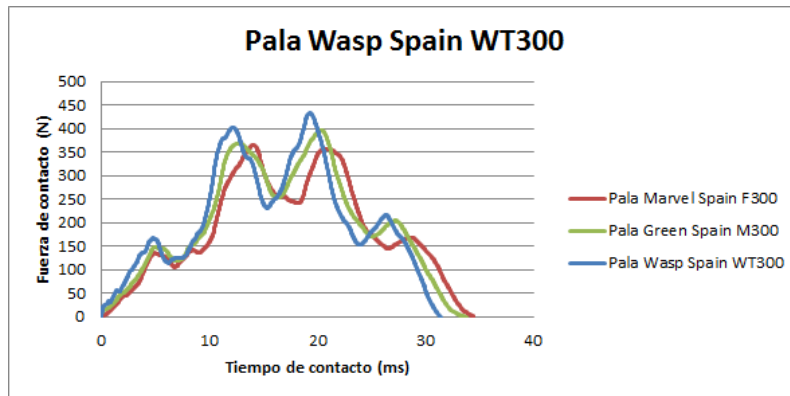


Figura 11.15: Comparación del comportamiento a impacto de las distintas palas

Observamos en la Figura 11.15, como un aumento de la rigidez cambiando la fibra de vidrio por fibra de carbono, se traduce en un aumento de la fuerza de contacto y una disminución del tiempo de contacto. Es ahora donde procedemos a la traducción de estos resultados a sensaciones para los jugadores, observamos que este aumento de rigidez, se traduce en *Shark Pádel* como un aumento del control sobre la pala, así como de la potencia de impacto en el juego.

Capítulo 12

Conclusiones

Se expondrán los puntos que se consideran de mayor trascendencia en la presente investigación:

- Como se comenta anteriormente, la consecución exitosa de un modelo funcional de pala para *Shark Pádel*, puede implicar a tiempo futuro una gran ahorro de costes de fabricación y realización de prototipos.
- El utillaje empleado ha sido útil para los ensayos de flexión, pero en cuanto a los ensayos de torsión se propone como línea futura su modificación tales como la realización de un orificio con la forma del mango en un bloque de un material suficientemente rígido, de forma que podamos asegurar el contacto y, por lo tanto, el empotramiento en todas las caras.
- La caracterización de la espuma tendrá gran importancia de cara a conocer como se deforma nuestra pala, hemos observado la influencia que tiene pequeñas modificaciones del módulo elástico de la misma en el ensayo estático. En cuanto al modelo dinámico, observamos no influye en la fuerza de contacto, pero sí en la absorción de energía por lo que se propone su correcta caracterización y modelización, ya que en el modelo realizado, no se contempla ningún tipo de degradación ni por lo tanto, absorción de energía.
- Con el modelo en elementos finitos realizado, resulta relativamente fácil realizar todas las modificaciones que deseemos, ahorrando así una gran cantidad de dinero por ejemplo, ahorrando la realización de agujeros sobre la pala. Podemos saber a priori si la disposición de agujeros será acertada o no.
- El proceso de fabricación resulta de gran importancia ya que, el compactado conseguido en las capas, influirá en el comportamiento de nuestra pala. Con el modelo logrado, podemos analizar la influencia de los distintos parámetros tales como materiales, espesores, propiedades...
- Se ha profundizado en el uso y funcionamiento de la máquina de caída de dardo *CEAST 9350 de la empresa INSTRON*, afianzando conocimientos tales como la importancia del predisparo.
- Se comprueba la repetitividad de los ensayos dentro de una misma pala, no así de una pala a otra, que existirán pequeñas discrepancias.

- Se observan en los ensayos estáticos, existen asentamientos del sistema mecánico y del sistema de aplicación de carga que falsean los resultados obtenidos, los cuales desaparecen después de la realización del primer ensayo.
- El utillaje utilizado, servirá para futuras investigaciones de distintos modelos de pala, podrá continuarse la investigación sin la realización de un nuevo utillaje si queremos analizar el comportamiento a flexión.
- Por último, resaltar que se ha continuado con la línea de investigación de los tutores de este TFG, los doctores Germán Castillo López y Felipe García Sánchez, introduciendo nuevas herramientas de análisis como la parametrización del modelo.

Capítulo 13

Líneas futuras

Con este TFG, se ha conseguido avanzar bastante en la investigación, se ha obtenido un modelo que se asemeja a la realidad, con lo cual lo que queda en adelante es cambiar las propiedades de los materiales para analizar la influencia en el comportamiento de la pala.

En primer lugar, se debe pulir el proceso de fabricación, con el fin de conseguir homogeneidad entre palas, empezando por el tubo de llenado o *braiding*. Para esta investigación, se sugiere realizar un molde de metacrilato, con el fin de analizar lo que realmente ocurre en el proceso de llenado, que es una de las incógnitas de la actual investigación. Con esto se querrá conseguir una disposición uniforme del braiding sobre las paredes de la pala, con el fin de que la fibra forme un ángulo θ constante.

Uno de los factores relevantes en cuanto a la deformación de la pala, es el módulo de elasticidad de la espuma. Se sugiere realizar un análisis exhaustivo de dicha propiedad, mediante ensayos de las propiedades sin contacto, para ello se aconseja la técnica DIC (Correlación Digital de Imágenes) el cual servirá para realizar los ensayos a distintas velocidades de deformación, con el fin de analizar el comportamiento viscoelástico de la espuma y obtener una relación entre el módulo de elasticidad y la velocidad de deformación. Para la realización de este tipo de ensayo será necesario el útil conveniente como puede ser una cámara de baja velocidad, el software de cálculo correspondiente, luz artificial... El objeto de este análisis será caracterizar como se comporta la espuma en el ensayo cuasi-estático, y comprobar lo que se detalla en este TFG, el aumento del módulo elástico de la misma al aumentar la velocidad de deformación debido a su comportamiento viscoelástico. Posteriormente, analizar influencias en el modelo dinámico.

Un factor influyente en la “jugabilidad” de la pala, será la espuma. Una vez finalizado este TFG, resultará muy cómodo acudir al modelo, cambiar las propiedades de la espuma y comprobar resultados. Además de la espuma, también podremos analizar la transcendencia de las capas de fibra, la rigidez aportada será clave en este apartado, así como la posibilidad de estar a la vanguardia mediante la aplicación de Kevlar o incluso finas capas de aluminio, a fin de comprobar si realmente obtenemos beneficios con estas incorporaciones.

Otro aspecto interesante sería el análisis a fatiga de la pala pues, un aspecto realmente diferenciador será, que nuestra pala conserve sus propiedades durante un largo tiempo, más que la competencia, lo que sin duda, podría dar grandes beneficios a *Shark Pádel*.

A la vista de nuestro modelo, observamos que no tenemos los agujeros característicos de una pala de pádel, he ahí otra fuente de línea futura de investigación, ¿Cuántos disponer?, ¿De qué tamaño?, ¿De qué forma?, ¿Qué distribución?. Estamos hablando de investigaciones que están a la orden del día en empresas punteras del sector como puede ser *Dunlop*.

En este TFG se ha analizado el comportamiento de un modelo de pala, MARVEL, pero no es el único que tiene *Shark Pádel*, se adjunta en el Apéndice D de este TFG, el catálogo de palas con su información en cuanto a capas de fibra carbono y vidrio, lo cual será relevante para el próximo investigador que analice el comportamiento de estas palas, a fin de realizar una correlación entre resultados mecánicos y sensaciones.

Por último, a sugerencia de *Tomás Gómez*, profesor de pádel de la Escuela Autónoma de Dirección de Empresas (EADE), puede ser interesante el análisis de degradación de las palas con la humedad, sobretodo si tenemos en cuenta que nos encontramos en una ciudad costera como es Málaga, actualmente, a nivel profesional debido a este factor, una pala no dura más de 3 meses de uso, por lo que puede ser otro elemento diferenciador.

Bibliografía

- [1] AN INTRODUCTORY GUIDE TO NONLINEAR ANALYSIS, *MSC Software Corporation* 2011
- [2] BASIS NONLINEAR ANALYSIS USING MARCAND MENTAT, *MSC Software Corporation* Course notes
- [3] CARACTERIZACIÓN Y SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ANTE IMPACTO DE ESTRUCTURAS COMPUESTAS TIPO SÁNDWICH. PROPUESTA METODOLÓGICA PARA UN CASO REAL: PALA DE PÁDEL, *Sergio Caballero Encinas* Trabajo de Fin de Grado. Septiembre de 2016
- [4] CHARACTERISATION AND MODELLING OF TRANSVERSELY ISOTROPIC FLEXIBLE VISCOELASTIC FOAM, *Qusai Hatem Jebur* Universidad de Glasgow, 2013
- [5] DAVID MORA SERRANO, *Cómo elegir la pala de pádel adecuada* Fecha de acceso: 6 de mayo de 2017
- [6] GERMÁN CASTILLO LÓPEZ, *Introducción a los materiales compuestos de matriz orgánica. Diseño ensayo y fabricación* Curso On Line, Universidad de Málaga, 2014
- [7] ENGINEERING MATERIALS 2, AN INTRODUCTION TO MICROSTRUCTURES, PROCESSING AND DESIGN, *F. Ashby, Michael y R.H. Jones, David* 1998
- [8] EXPLICIT NONLINEAR ANALYSIS USING NASTRAN & PATRAN , *MSC Software Corporation* Course notes
- [9] EXPLICIT NONLINEAR USER'S GUIDE, *MSC Software Corporation* Revisión 1
- [10] IMPLICIT NONLINEAR USER'S GUIDE, *MSC Software Corporation* Revisión 0
- [11] INTRODUCCIÓN A LOS MÉTODOS DE SOLUCIÓN NUMÉRICOS EN DIFERENCIAS PARCIALES, *Universidad Politécnica de Madrid* 2013
- [12] POLYPROPYLENE FOAM BEHAVIOUR UNDER DYNAMIC LOADING: STRAIN RATE, DENSITY AND MICROSTRUCTURE EFFECTS, *Remy Bouix, Philippe Viot, Jean-Luc Lataillade* 15 de mayo 2008
- [13] STEVEN M. LEPI., *Practical Guide to Finite Elements a solid mechanics approach*
- [14] DANIEL GAY, SUONG V. HOA & STEPHEN W. TSAI , *Composite Materials, Design and Applications* Julio 2002.

- [15] QUICK REFERENCE GUIDE, *MSC Software Corporation* Revisión 0
- [16] SIMULACIÓN DE IMPACTO DE BAJA ENERGÍA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS, *Pablo Antonio Mesa Castro* Trabajo de Fin de Grado. Septiembre de 2014
- [17] SIMULACIÓN DE IMPACTO SOBRE MATERIALES COMPUESTOS LAMINADOS, *Ismael Burgos de la Rosa* Septiembre 2015
- [18] TAKING ADVANTAGE OF PATRAN SESSION/JOURNAL FILES, *John Parady* Junio 2009
- [19] TEORÍA SOBRE LA RESISTENCIA A ROTURA DE UNA LÁMINA, *Universidad Carlos III de Madrid* 2004

Apéndices

Apéndice A

Manual de parametrización en Patran

1. Introducción

Se expone el presente apéndice con el fin de agilizar el proceso de convergencia de malla para el próximo investigador. Esta herramienta resulta muy útil cuando estamos realizando modelos complejos, aunque sea más costoso realizar un primer modelo, generar otros a partir de este será un proceso más ágil [18].

En lugar de explicarlo teóricamente, vemos mejor su funcionamiento en un ejemplo simple. Analizaremos la parametrización en una placa de acero, la cual se encuentra empotrada en uno de sus laterales. Dado que este apéndice no es más que un tutorial, realizaremos un análisis elástico lineal como se muestra en la Figura A.1.

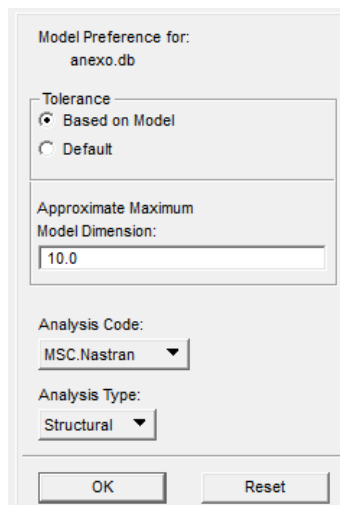


Figura A.1: Análisis lineal en el ejemplo de parametrización

2. Geometría

Definiremos una geometría simple rectangular, de tipo placa o *shell* (nótese que el procedimiento de parametrización puede también controlar la geometría, no solo el mallado). Creamos 4 puntos:

- Punto A: (0,0,0)
- Punto B: (10,0,0)
- Punto C: (10,20,0)
- Punto D: (0,20,0)

Una vez creados los puntos, definimos las curvas que conectan dichos puntos y posteriormente, creamos la superficie que se muestra en la Figura A.2.

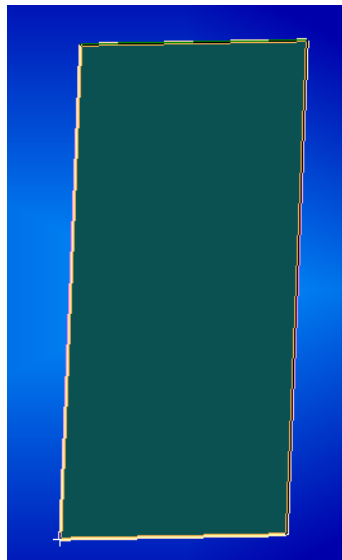


Figura A.2: Geometría creada para el ejemplo de parametrización

Definimos un acero común, con un módulo de elasticidad de 210.000 MPa y un coeficiente de Poisson de 0.3.

3. Parametrización

Aquí es donde comienza el procedimiento de parametrización, abrimos un archivo *.txt* y definimos nuestros parámetros:

- Si queremos parametrizar el número de elementos en una línea, utilizaremos como parámetro: **Integer NOMBREPARÁMETRO = VALOR-PARÁMETRO.**
- Si queremos esparcir el mallado, en lugar de crear una semilla uniforme (en Patran *Mesh seed*), crearemos una semilla *One Way Bias* o *Two Way Bias*, es decir, dará el número de divisiones que establezcamos con el parámetro Integer, y establecerá una relación dentro de la curva, la cual se caracteriza con un parámetro tipo: **Real NOMBREDELPARAMETRO = VALORDE-PARÁMETRO**

Así en nuestro modelo realizaremos los siguientes parámetros:

- Integer LONGITUDLARGA = 10
- Real RELACION = 2
- Integer LONGITUDCORTA = 5

Por lo que, realizaremos en la curva de 20 mm de longitud 10 divisiones, comenzando con un tamaño X y terminando con un tamaño 2X. Mientras que en la curva de 10 mm de longitud, realizaremos 5 divisiones de 2 mm cada una.

A continuación, activamos el grabado de Patran como se muestra en la Figura A.3, esta opción creará un archivo *.txt* que recogerá absolutamente **TODO** lo que hagamos en el programa, esté bien o mal realizado, incluso los giros que realicemos a la pieza para visualizarla mejor.

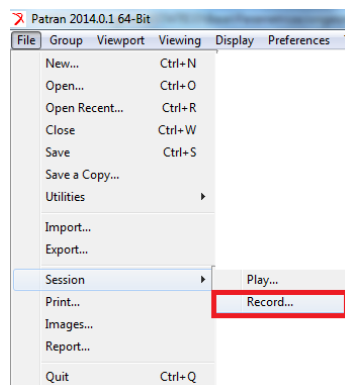


Figura A.3: Grabado automático de todas las acciones realizadas en Patran

Ahora realizamos nuestro modelo de forma normal, habiendo guardado ya la geometría final como punto de partida de la parametrización. Para realizar la semilla vamos a *Elements, Action: Create, Object: Mesh Seed*, y en primer lugar, definiremos el mallado uniforme, debemos introducir el nombre del parámetro entre dos acentos graves. En la Figura A.4, se muestra la forma correcta de proceder.

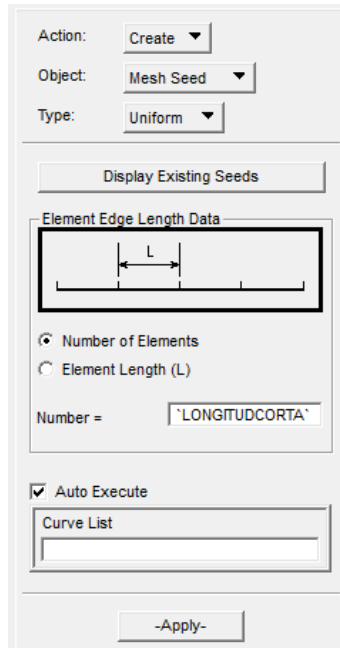


Figura A.4: Forma correcta de referenciar a parámetros predefinidos

Una vez parametrizamos todas las curvas, obtendremos la semilla que se muestra en la Figura A.5.

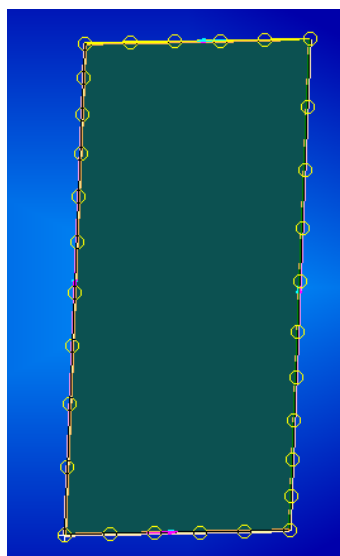


Figura A.5: Semilla creada en nuestra geometría base

Procedemos a mallar nuestro primer modelo y obtenemos la Figura A.6 (la distorsión observada es debido al sentido de definición del parámetro de relación y de la curva).

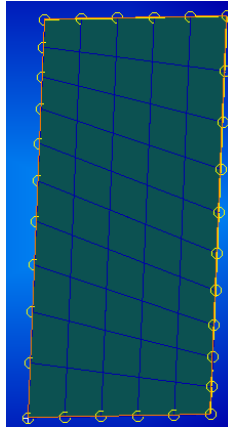


Figura A.6: Mallado base realizado en el ejemplo de parametrización

Imponemos nuestras condiciones de contorno, por ejemplo empotramos una de las longitudes cortas y aplicamos una carga de 20 N en la esquina superior derecha, ver Figura A.7.

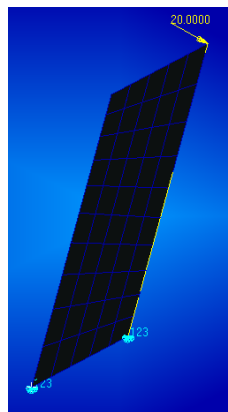


Figura A.7: Condiciones de contorno aplicadas sobre nuestro modelo de ejemplo

Ya tendríamos nuestra parametrización completada, se ha hecho un modelo simple para la comprensión del lector, y ahora poder poner el resultado final sin extenderse mucho en este apéndice, a fin de que se pueda comprobar si se han seguido bien los pasos.

4. Archivo .txt de parametrización final

Se muestra a continuación el resultado final correcto:

```
Integer LONGITUDLARGA = 10;
Integer LONGITUDCORTA = 5;
REAL RELACION = 2;
mesh_seed_create( "Curve 2", 1, 'LONGITUDCORTA', 0., 0., 0. )
mesh_seed_create( "Curve 4", 1, 'LONGITUDCORTA', 0., 0., 0. )
mesh_seed_create( "Curve 3", 3, 'LONGITUDLARGA', 2., 0., 0. )
mesh_seed_create( "Curve 1", 3, 'LONGITUDLARGA', 2., 0., 0. )
INTEGER fem_create_mesh_surfa_num_nodes
INTEGER fem_create_mesh_surfa_num_elems
STRING fem_create_mesh_s_nodes_created[VIRTUAL]
STRING fem_create_mesh_s_elems_created[VIRTUAL]
fem_create_mesh_surf_4( "IsoMesh", 49152, "Surface 1", 1, ["2.66667"], "Quad4"@ ,
"#", "#", "Coord 0", "Coord 0", fem_create_mesh_surfa_num_nodes, @ fem_create_mesh_surfa_num.e
fem_create_mesh_s_nodes_created, @ fem_create_mesh_s_elems_created )
mesh_seed_display_mgr.erase( )
loadsbc_create2( "Empotramiento", "Displacement", "Nodal", , "Static", [ @ "Cur-
ve 4"], "Geometry", "Coord 0", "1.", [ "< 0 0 0 >", "< >", "< >", @ "< >"], [ "",
"", "" ] )
loadsbc_create2( "Carga", "Force", "Nodal", "", "Static", ["Point 3"], @ "Geo-
metry", "Coord 0", "1.", [ "< 0 0 -20 >", "< >", "< >", "< >00" ] @ , [ "", "", "" ,
"" ] )
ga_view_aa_set( -48.071346, -53.031235, -22.466305 )
```

Se recomienda no copiar simplemente el resultado final, en lugar de ello, usarlo solo a modo de comprobación, ya que las órdenes generadas no son de fácil comprensión. Por otro lado, operaciones precedidas con \$ serán suprimidas al igual que deberían serlo las líneas como la última `ga_view...` ya que son órdenes de visualización. Cuanto mayor sea el archivo de parametrización `.ses`, mayor será el tiempo que tarde.

Para realizar la convergencia de malla, simplemente cambiar los valores a los parámetros y en la Figura A.3, en lugar de darle a *Record...*, le damos a *Play...* y se procederá a la realización de nuestra parametrización.

Apéndice B

Archivos generados por Nastran

1. Introducción

Este apéndice se desarrolla a raíz de la experiencia propia, se cree necesario una pequeña ayuda para saber si estamos haciendo bien el análisis o no, ahorrando el tiempo de búsqueda de errores sabiendo donde acudir a solucionarlos.

2. Tipos de archivos

Partimos de la base de Patran, este software genera nuestro modelo (geometría, mallado y condiciones de contorno) en un archivo *.DB*, el cual no resulta útil para el análisis, se utiliza para una visualización del modelo.

Una vez realizamos un análisis tal y como se puede observar en el Capítulo 6 del TFG de Sergio Caballero Encinas, Patran genera un archivo *.BDF*, éste será el más importante de todos.

Pasando a Nastran, se generarán en el proceso de análisis un gran número de archivos, en el caso en el que nos concierne, nos centraremos en los más importantes: *.F06*, *.dytr.OUT*, *.dytr.D3PLOT* y *.binout*.

2.1. *.BDF*

Este archivo traduce la información de Patran a lenguaje que entienda Nastran, pero no siempre es capaz de hacerlo, así, por ejemplo, se ruega acudir al TFG de Sergio Caballero Encinas, donde tenía materiales cohesivos que Patran no es capaz de generar y necesitan ser introducidos a mano.

Podremos solicitar que, para ahorrar cálculo se utilicen 4 procesadores en lugar de uno (acudir al Anexo A de Pablo Antonio Mesa Castro), lo que en problemas dinámicos es de gran ayuda. Además, como se explicará posteriormente cómo, al detectar errores, la gran mayoría pueden ser corregidos aquí, tales como propiedades incorrectas, errores de lenguaje, espesores inadecuados, materiales erróneos, etc.

2.2. .F06

Este archivo es el encargado de acudir al archivo *.BDF* y realizar un primer “chequeo”. Para hacernos una idea, un análisis de impacto sobre la pala tarda en realizarse entorno a 6 horas y media. Si Nastran se cerrase a los 2 minutos de cálculo, debemos abrir este archivo, bien con el bloc de notas o bien con un programa similar tipo *NotePad++*. Buscamos en el archivo la palabra “*FATAL*”, como se puede imaginar, lo que estamos buscando es un error grave que incapacite a Nastran. Encontraremos errores tipo materiales irreconocibles por Nastran, propiedades erróneas, etc. En caso de no encontrar “*FATAL*”, pasaríamos a buscar “*ERROR*”, con la misma intención, detectar errores similares a los comentados, pero ahora están más enfocados a errores de escritura.

Una vez encontrásemos los errores que se nos indican en el *.F06*, acudiríamos al *.BDF* a corregirlos.

Se puede dar el caso en el que no encontremos “*FATAL*”, y al encontrar “*ERROR*”, el mensaje sea que debemos acudir al *.dytr.out* que a continuación se comenta, esto significaría que en primera instancia no hay errores ni de escritura ni de introducción de materiales.

2.3. .dytr.out

El archivo *.F06* nos pedirá que busquemos en este archivo la palabra “*ERROR*”. En este *.dytr.out*, los errores encontrados suelen deberse a incongruencias tales como por ejemplo, imaginemos que tenemos un acero de 210.000 MPa de módulo elástico con un coeficiente de Poisson de 0.3, y le imponemos como dato que el módulo de cizalladura es de 4 MPa. Al no cumplirse la relación de $G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}$, este error no es detectado en primera instancia pero hace imposible el resultado.

Volviendo a nuestro caso, si no han surgido errores en los primeros 5-10 minutos, es que el programa está calculando. Si queremos saber cuánto le queda por calcular, este archivo se va sobrescribiendo continuamente con la información del tiempo que esta usando en cada iteración, cada cuántos segundos está guardando el archivo, y cuánto tiempo lleva del proceso. Así, si nuestro proceso total dura 0.3 segundos y vemos que el cálculo ha avanzado 0.05 segundos en un minuto, con una simple regla de tres observamos que el proceso tardará 6 minutos en realizar el cálculo completo. En este TFG el estudio de este archivo ha sido de gran ayuda ya que, al no tener a ciencia cierta orden de tiempos que tarda en realizarse los cálculos, ha dado lugar a bastantes horas de no saber qué estaba sucediendo y cancelar el proceso.

2.4. .D3PLOT

Este archivo es el visual, el que abrimos en el software *LS-DYNA* para la visualización del proceso. Tendremos la capacidad de regular cuántos archivos del problema queremos generar, puede ser importante ya que uno sólo de ellos puede ocupar 50 MB, si generásemos 2000, un solo análisis puede ocupar 20 GB. El tiempo de adquisición de datos es regulable en el *.BDF*, no necesitamos volver a Patran.

2.5. .binout

Será el archivo de resultados, el cual abriremos en *LS-DYNA* para la visualización de resultados dinámicos tales como la fuerza de contacto o la energía del proceso.

Apéndice C

Resultados obtenidos del ensayo cuasi-estático

1. Rigidez

En este apéndice, se mostrarán todas las mediciones obtenidas en el ensayo de la caracterización de rigidez estática de las palas (I-A, I-B, II-A, II-B, III-A y III-B).

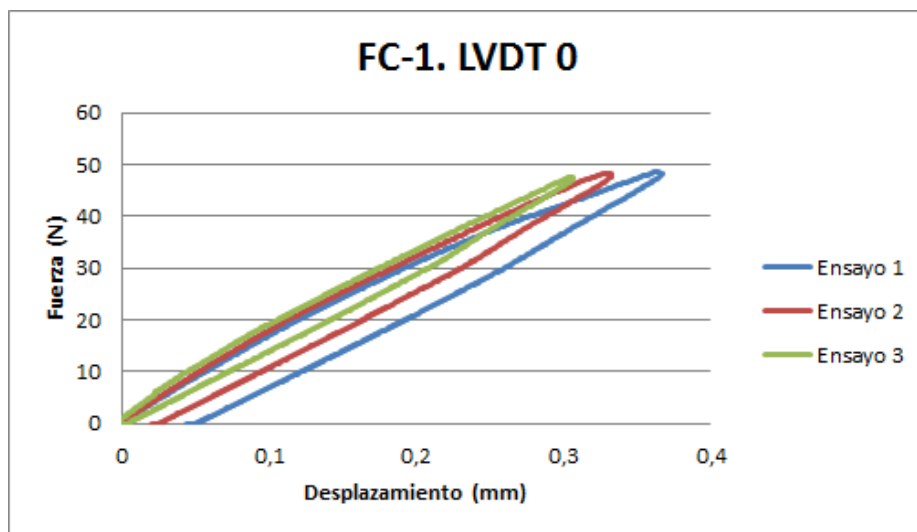


Figura C.1: Ensayo cuasi-estático I-A-FC-1-0

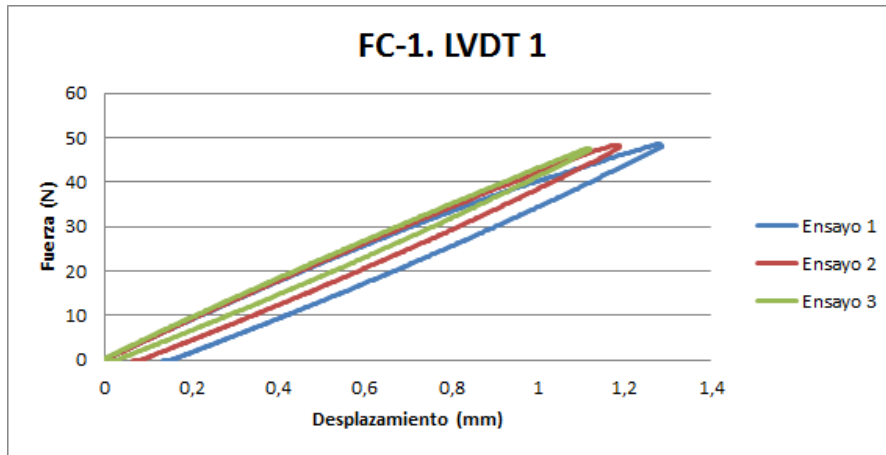


Figura C.2: Ensayo cuasi-estático I-A-FC-1-1

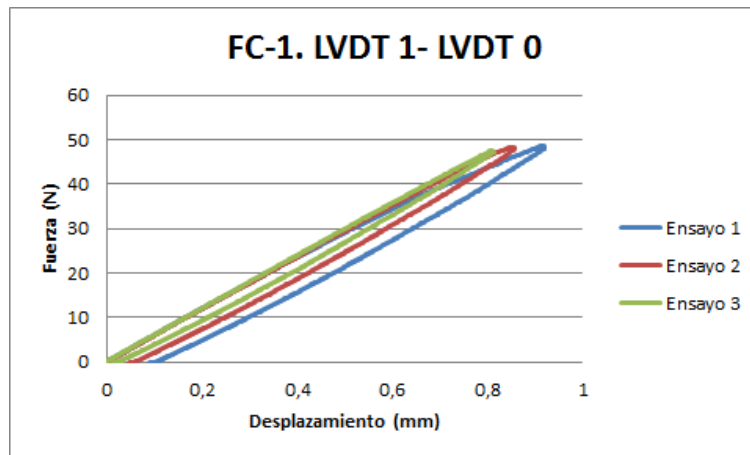


Figura C.3: Ensayo cuasi-estático I-A-FC-1-1-0

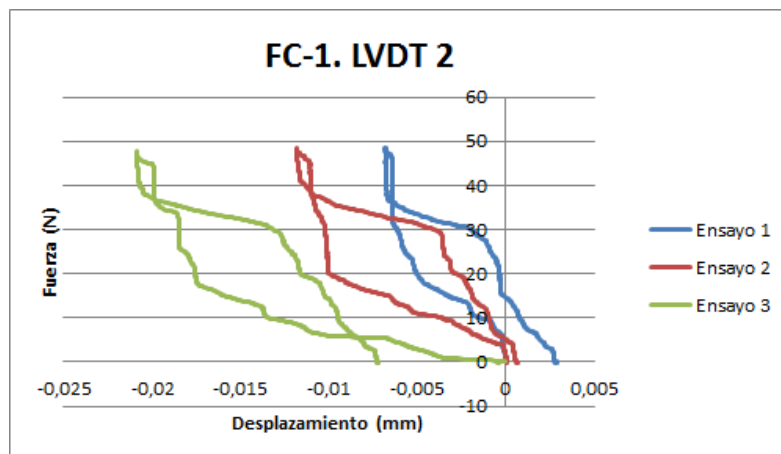


Figura C.4: Ensayo cuasi-estático I-A-FC-1-2

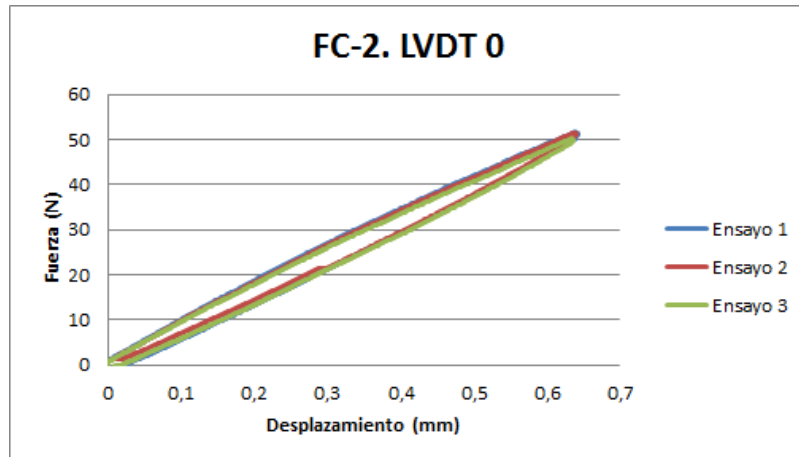


Figura C.5: Ensayo cuasi-estático I-A-FC-2-0

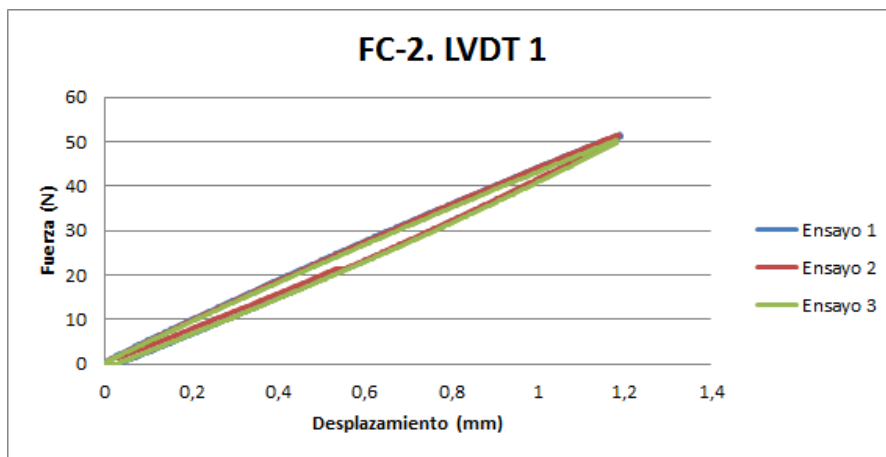


Figura C.6: Ensayo cuasi-estático I-A-FC-2-1

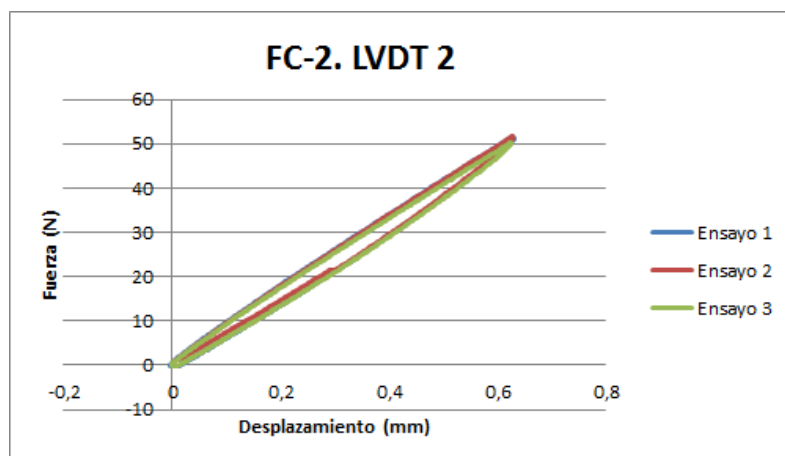


Figura C.7: Ensayo cuasi-estático I-A-FC-2-2

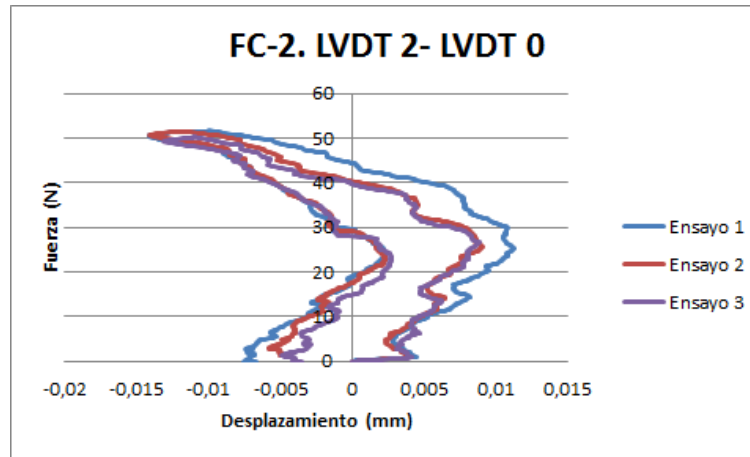


Figura C.8: Ensayo cuasi-estático I-A-FC-2-2-0

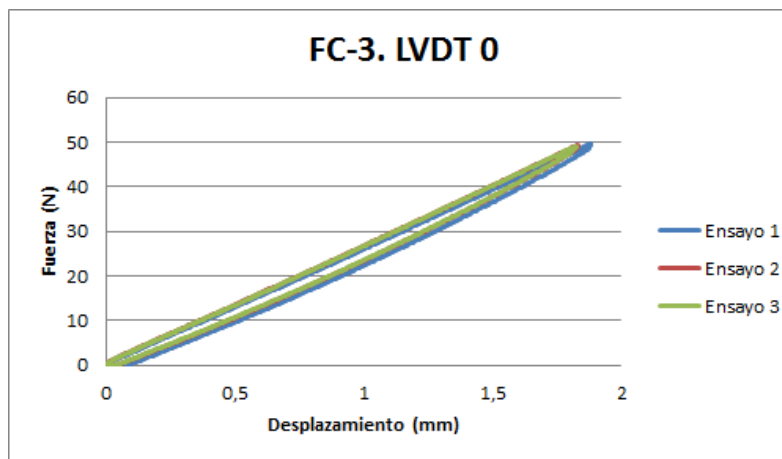


Figura C.9: Ensayo cuasi-estático I-A-FC-3-0

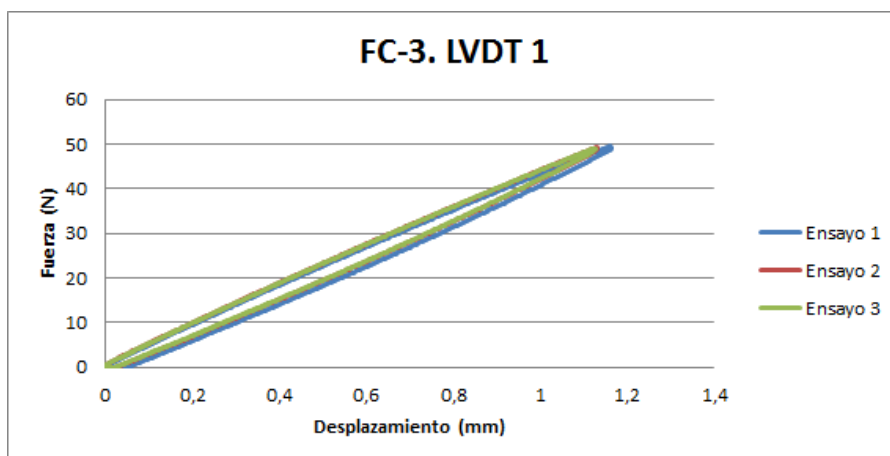


Figura C.10: Ensayo cuasi-estático I-A-FC-3-1

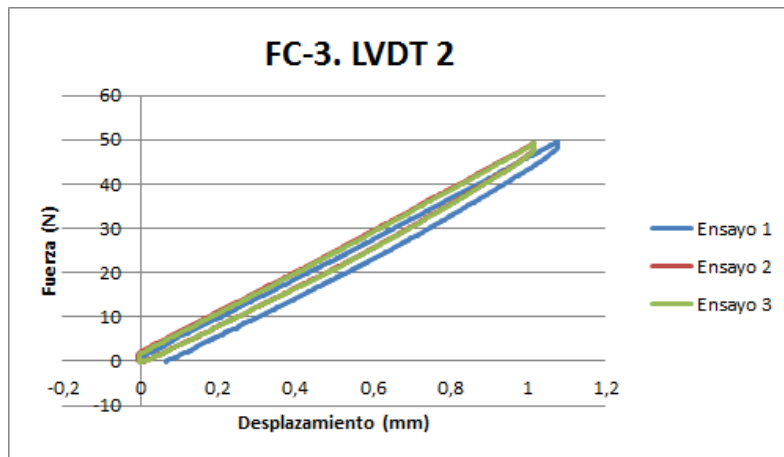


Figura C.11: Ensayo cuasi-estático I-A-FC-3-2

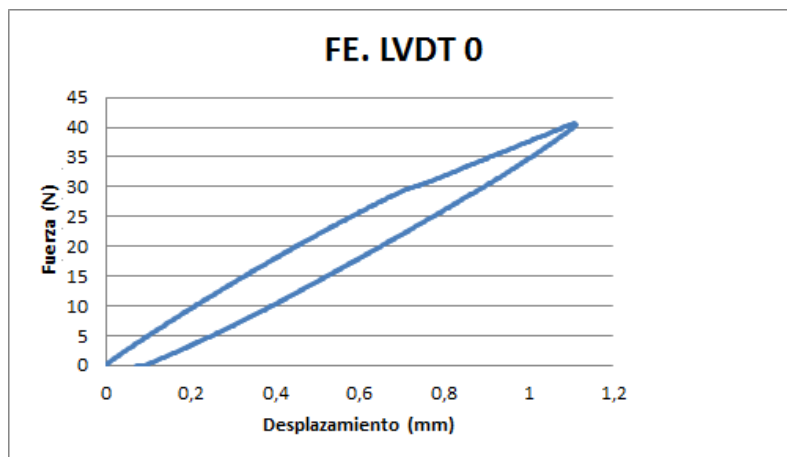


Figura C.12: Ensayo cuasi-estático I-A-FE-0

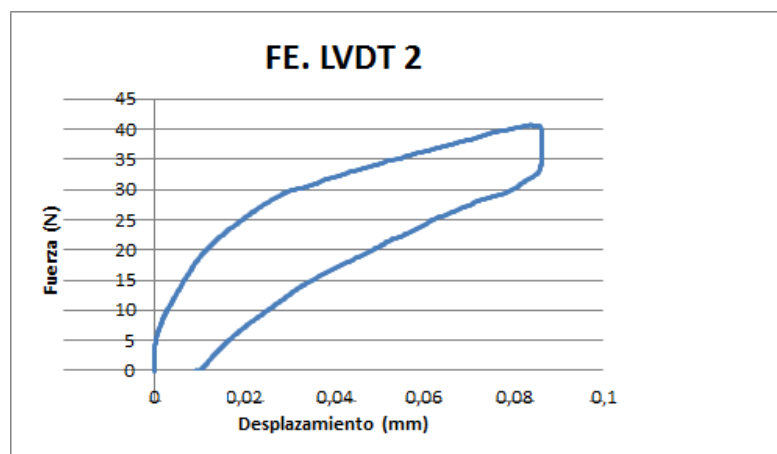


Figura C.13: Ensayo cuasi-estático I-A-FE-2

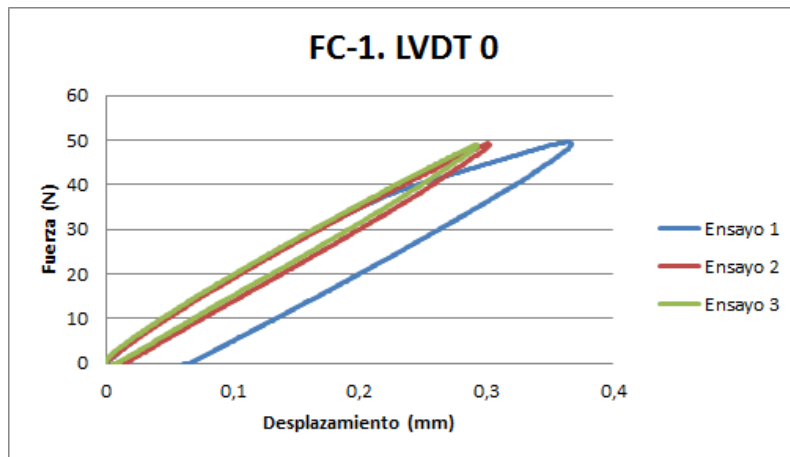


Figura C.14: Ensayo cuasi-estático I-B-FC-1-0

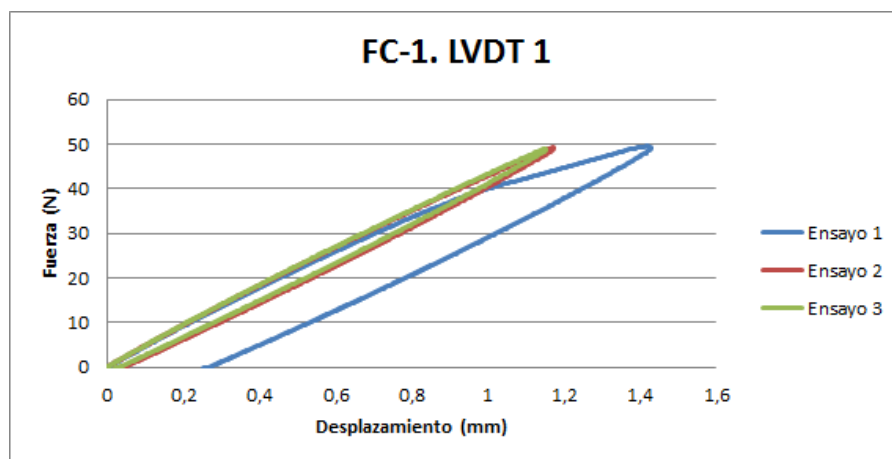


Figura C.15: Ensayo cuasi-estático I-B-FC-1-1

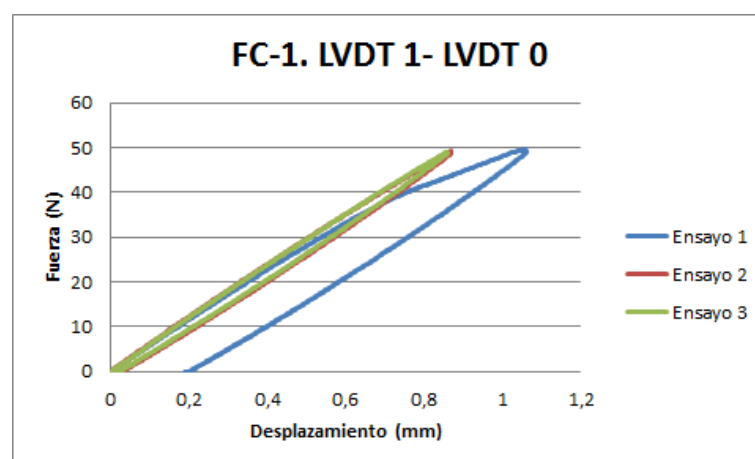


Figura C.16: Ensayo cuasi-estático I-B-FC-1-1-0

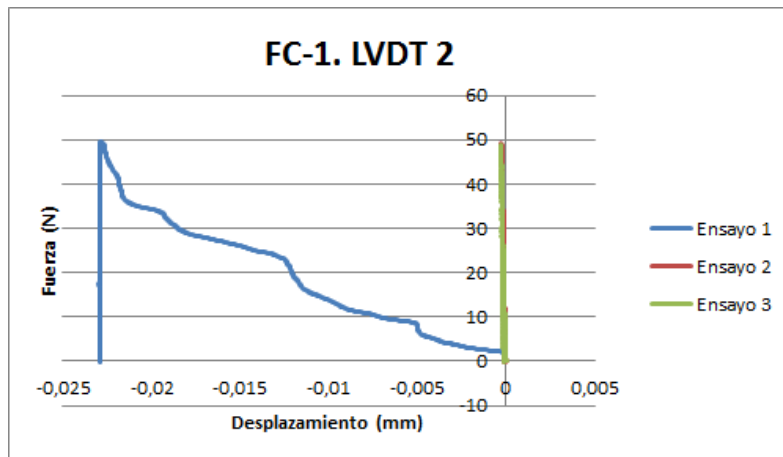


Figura C.17: Ensayo cuasi-estático I-B-FC-1-2

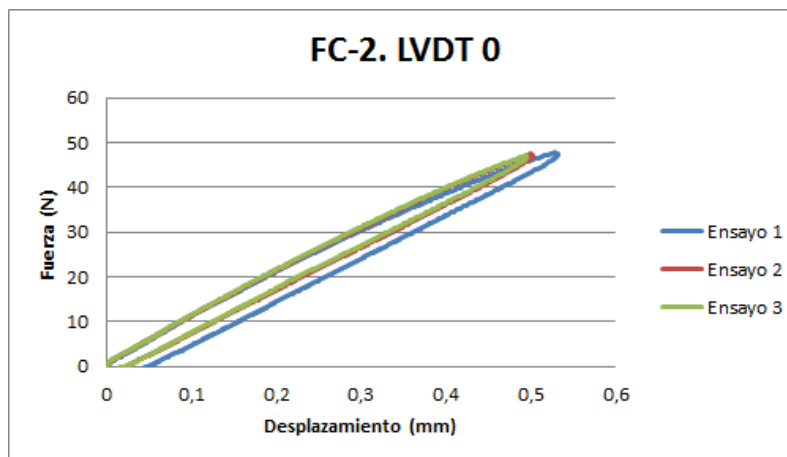


Figura C.18: Ensayo cuasi-estático I-B-FC-2-0

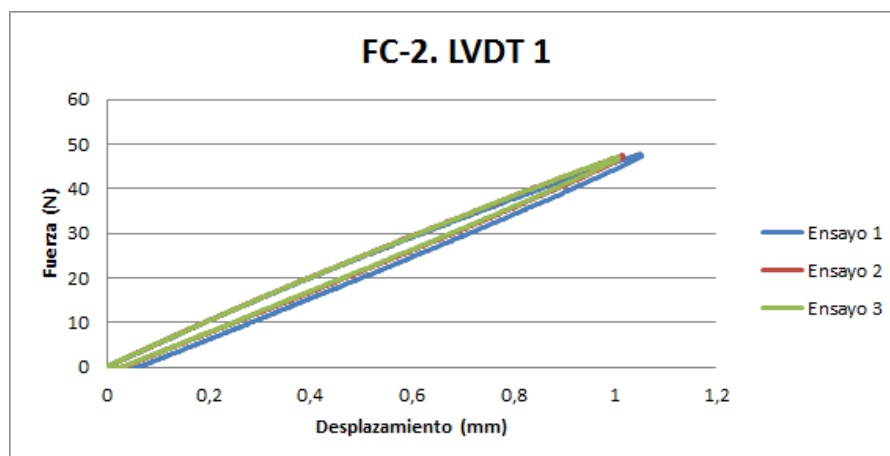


Figura C.19: Ensayo cuasi-estático I-B-FC-2-1

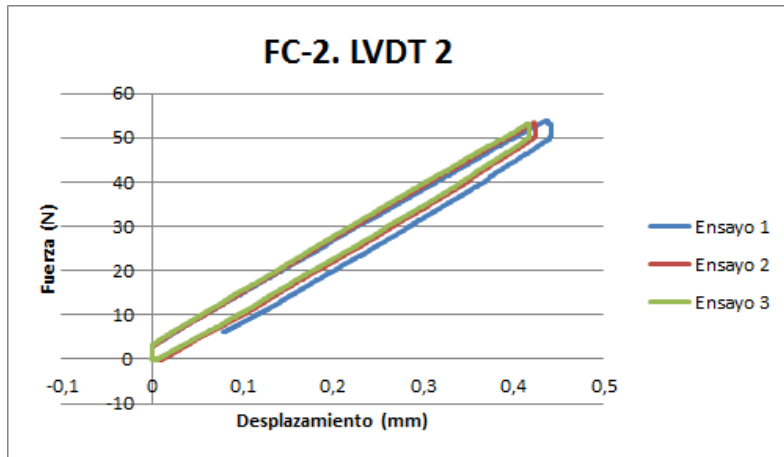


Figura C.20: Ensayo cuasi-estático I-B-FC-2-2

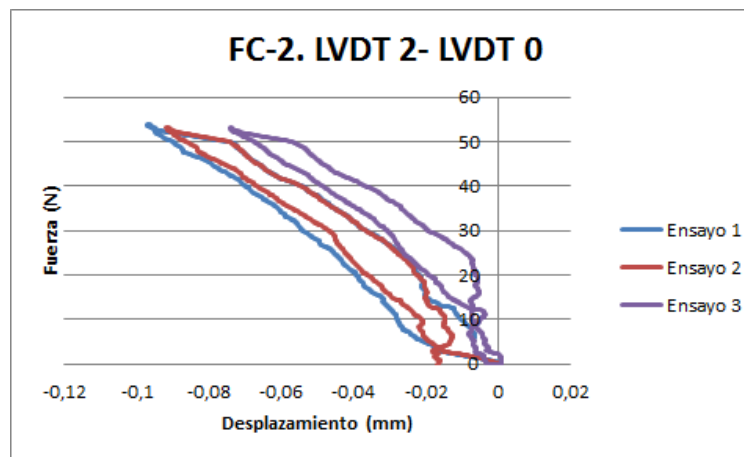


Figura C.21: Ensayo cuasi-estático I-B-FC-2-2-0

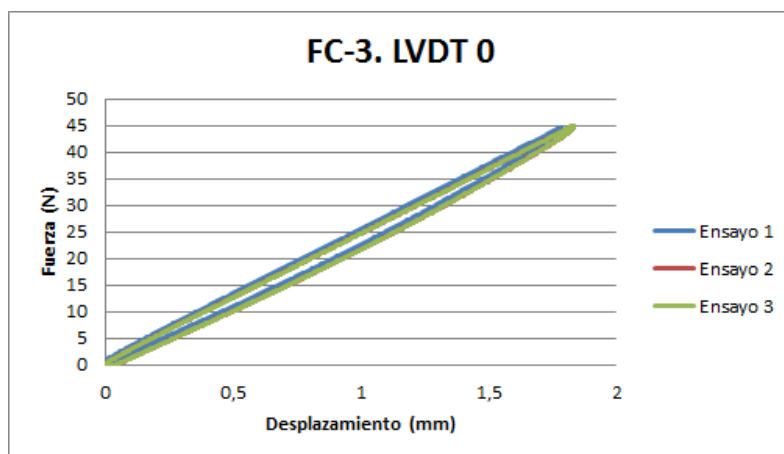


Figura C.22: Ensayo cuasi-estático I-B-FC-3-0

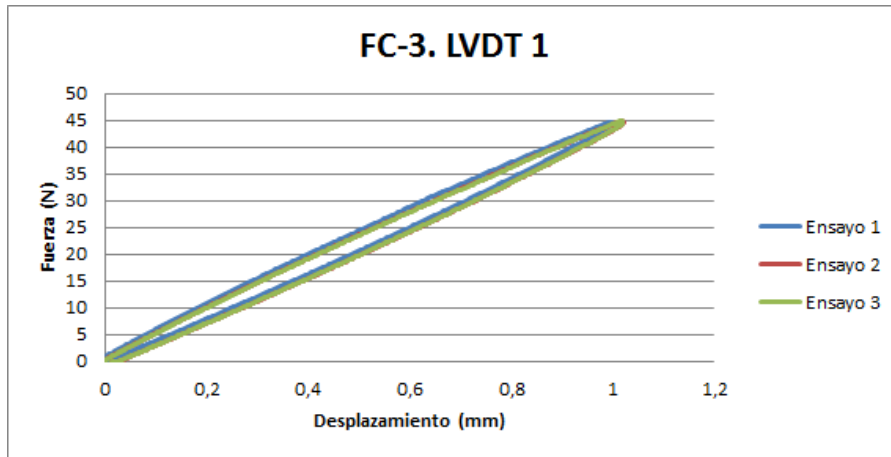


Figura C.23: Ensayo cuasi-estático I-B-FC-3-1

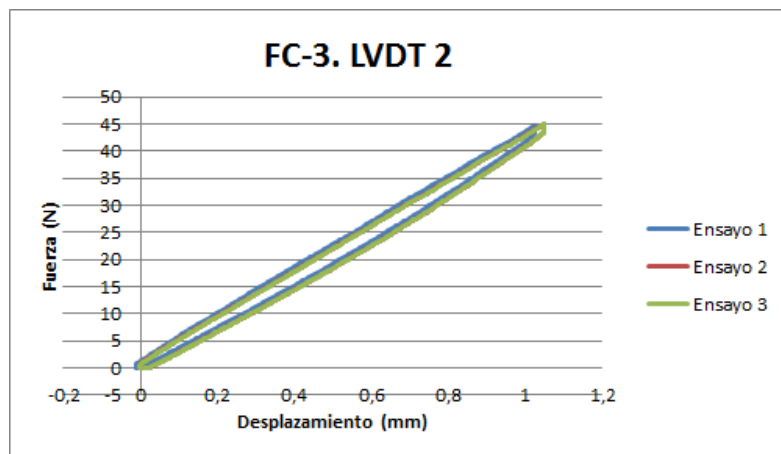


Figura C.24: Ensayo cuasi-estático I-B-FC-3-2

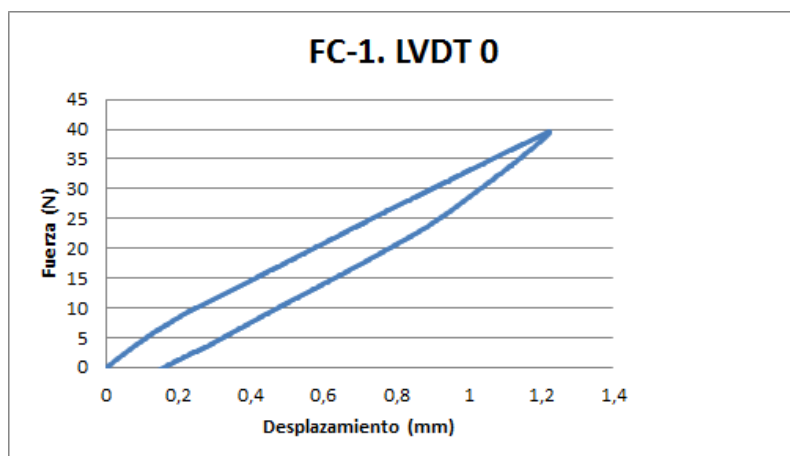


Figura C.25: Ensayo cuasi-estático I-B-FE-0

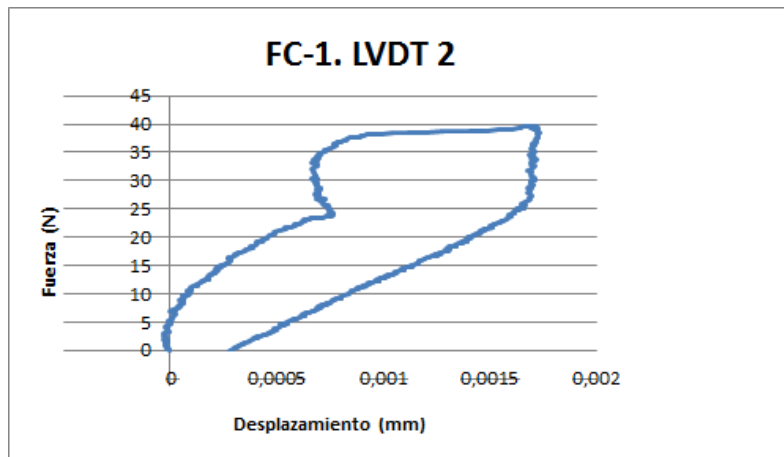


Figura C.26: Ensayo cuasi-estático I-B-FE-2

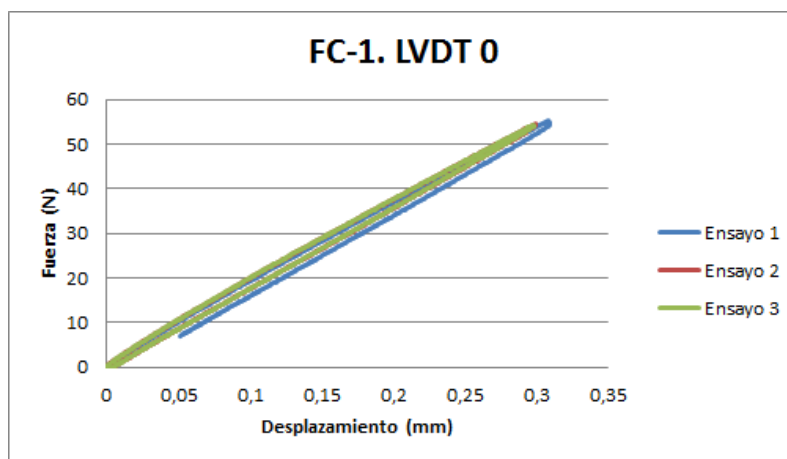


Figura C.27: Ensayo cuasi-estático II-A-FC-1-0

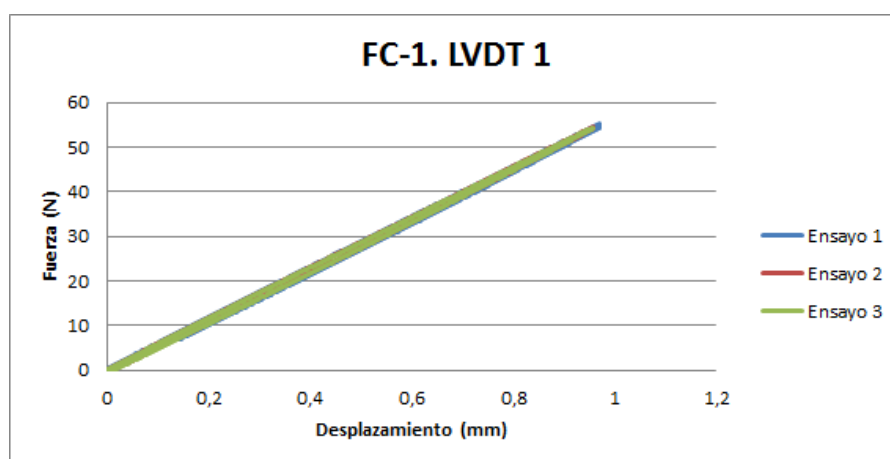


Figura C.28: Ensayo cuasi-estático II-A-FC-1-1

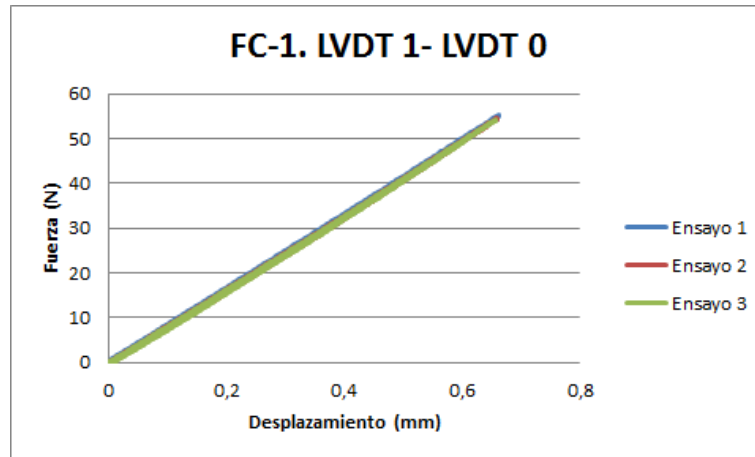


Figura C.29: Ensayo cuasi-estático II-A-FC-1-1-0

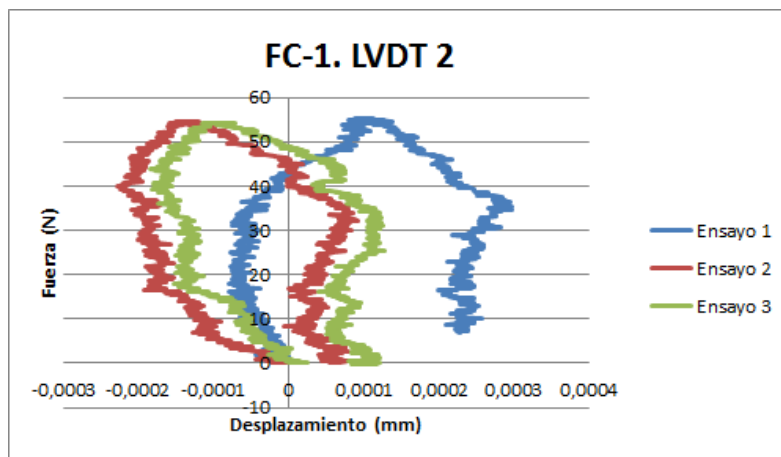


Figura C.30: Ensayo cuasi-estático II-A-FC-1-2

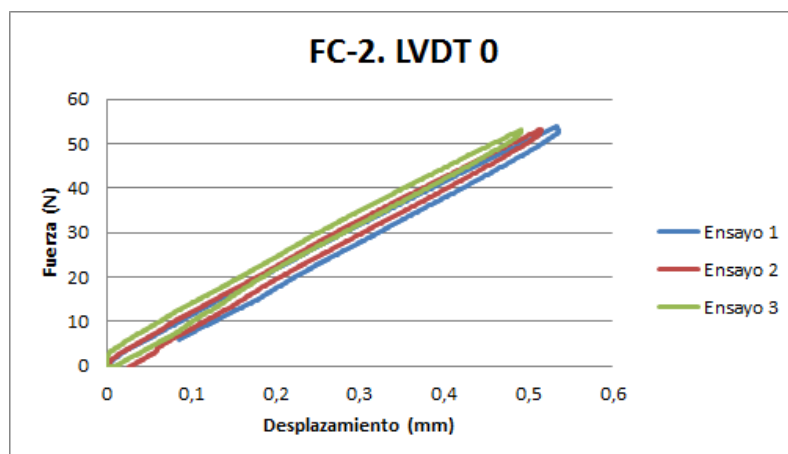


Figura C.31: Ensayo cuasi-estático II-A-FC-2-0

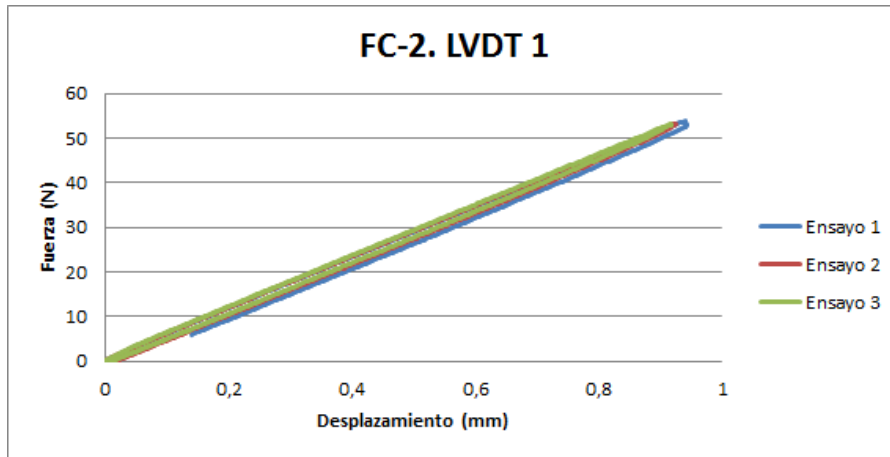


Figura C.32: Ensayo cuasi-estático II-A-FC-2-1

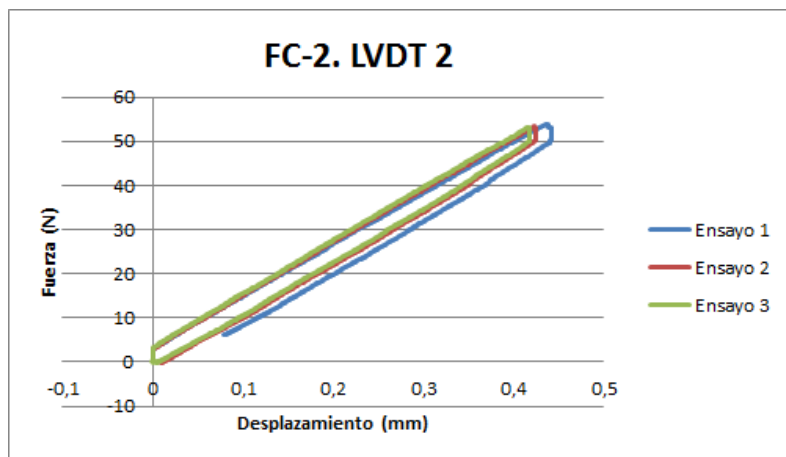


Figura C.33: Ensayo cuasi-estático II-A-FC-2-2

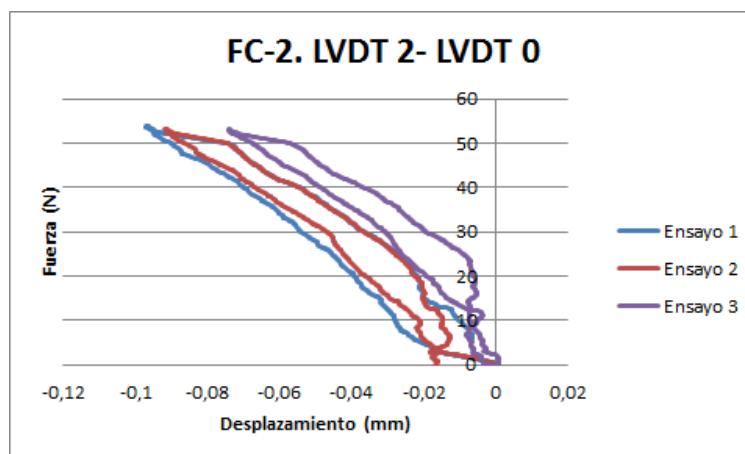


Figura C.34: Ensayo cuasi-estático II-A-FC-2-2-0

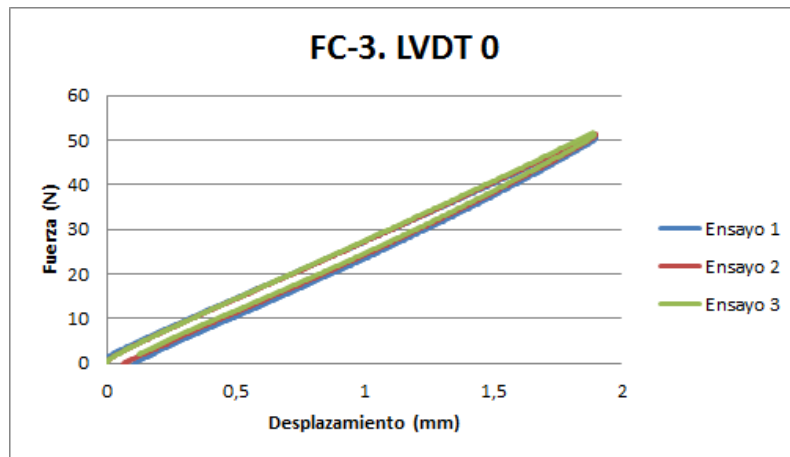


Figura C.35: Ensayo cuasi-estático II-A-FC-3-0

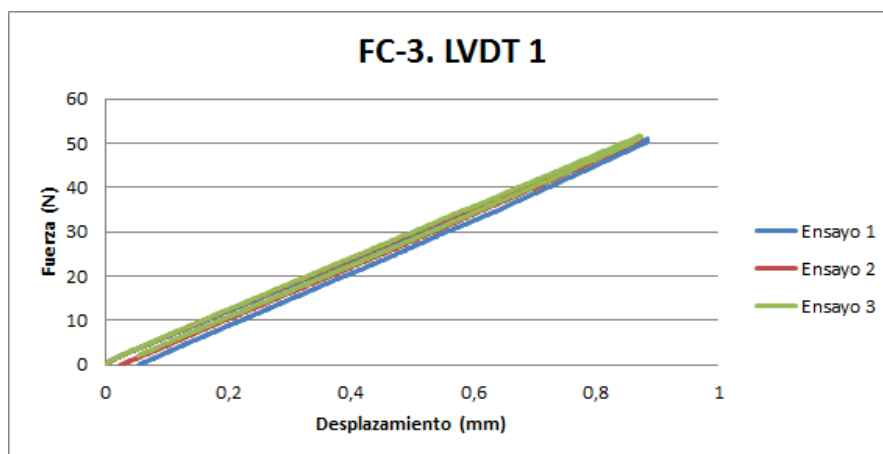


Figura C.36: Ensayo cuasi-estático II-A-FC-3-1

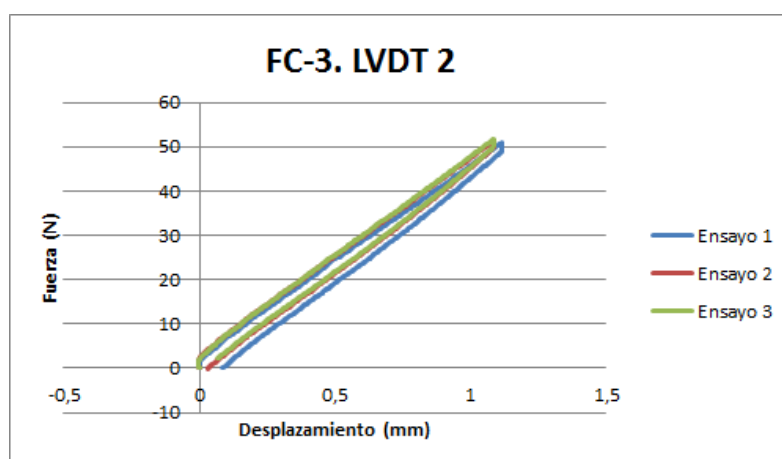


Figura C.37: Ensayo cuasi-estático II-A-FC-3-2

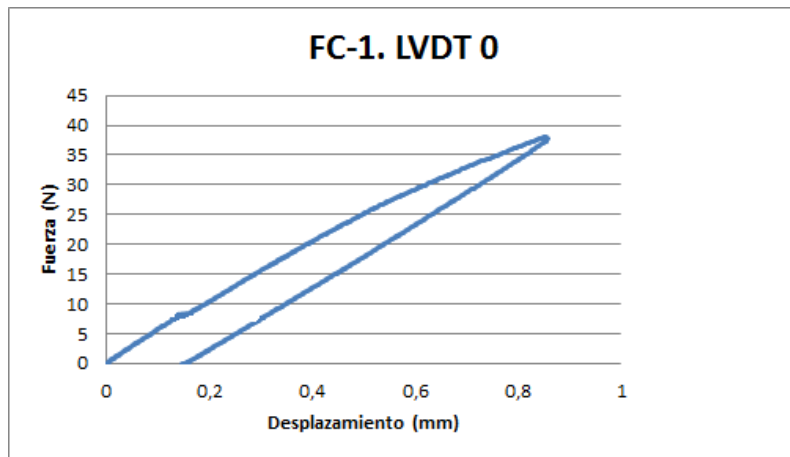


Figura C.38: Ensayo cuasi-estático II-A-FE-0

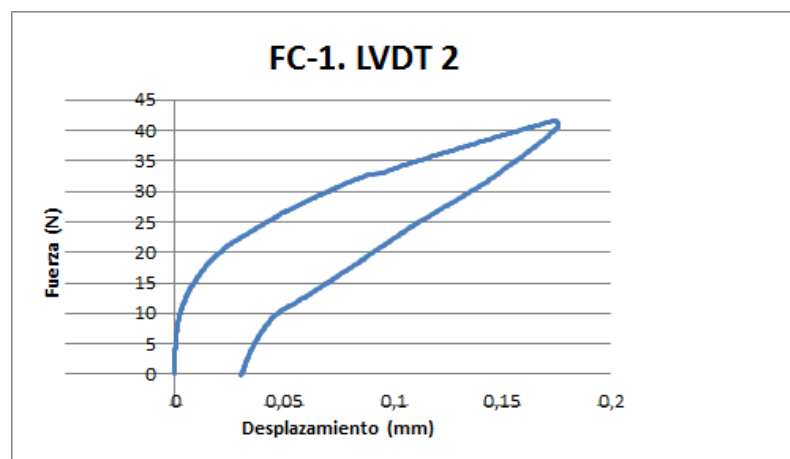


Figura C.39: Ensayo cuasi-estático II-A-FE-2

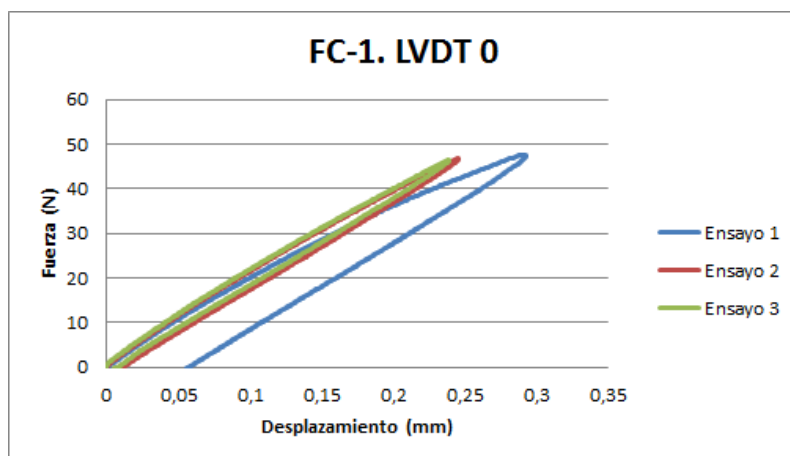


Figura C.40: Ensayo cuasi-estático II-B-FC-1-0

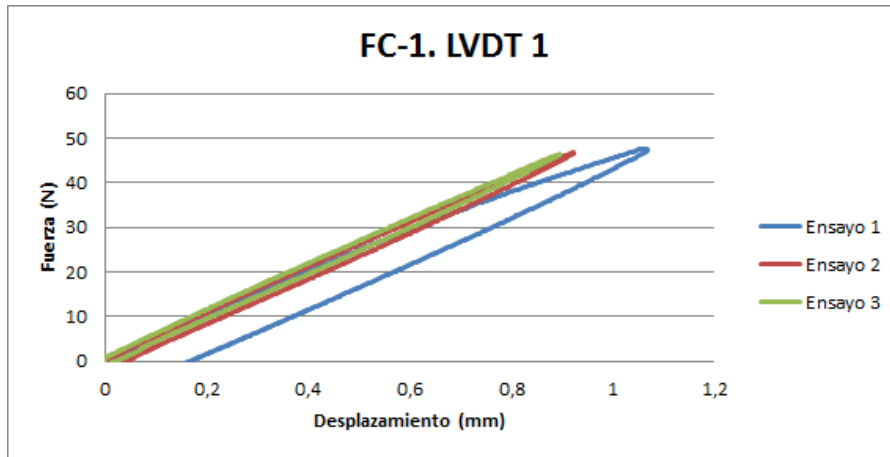


Figura C.41: Ensayo cuasi-estático II-B-FC-1-1

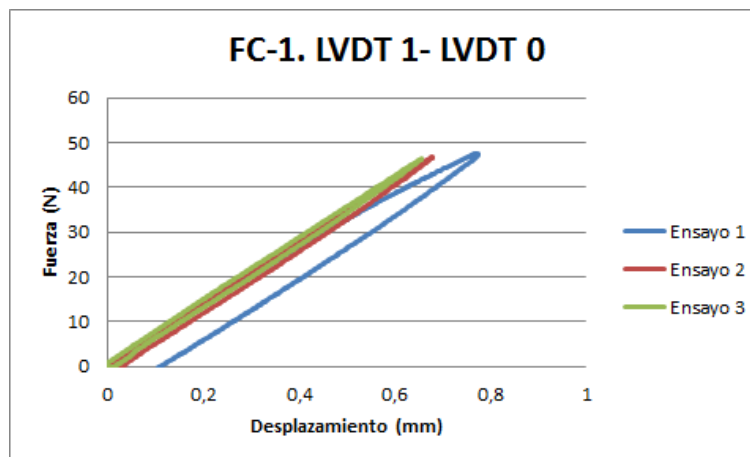


Figura C.42: Ensayo cuasi-estático II-B-FC-1-1-0

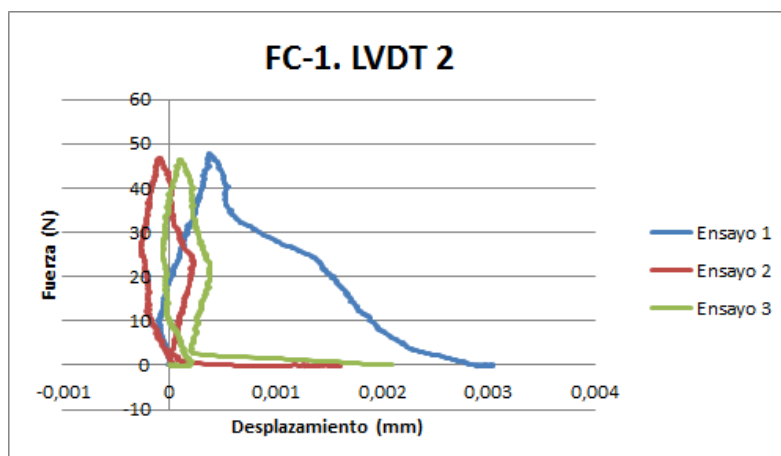


Figura C.43: Ensayo cuasi-estático II-B-FC-1-2

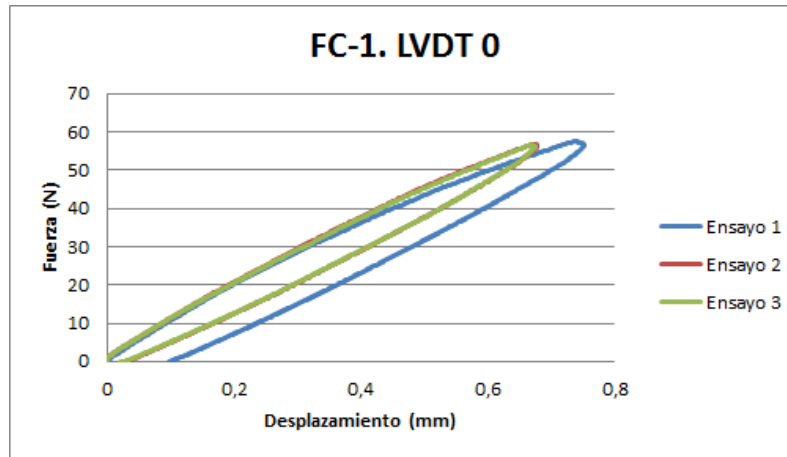


Figura C.44: Ensayo cuasi-estático II-B-FC-2-0

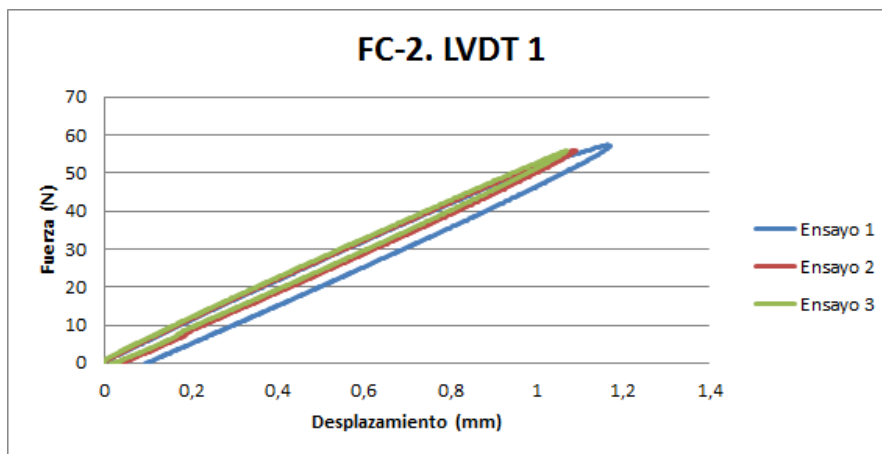


Figura C.45: Ensayo cuasi-estático II-B-FC-2-1

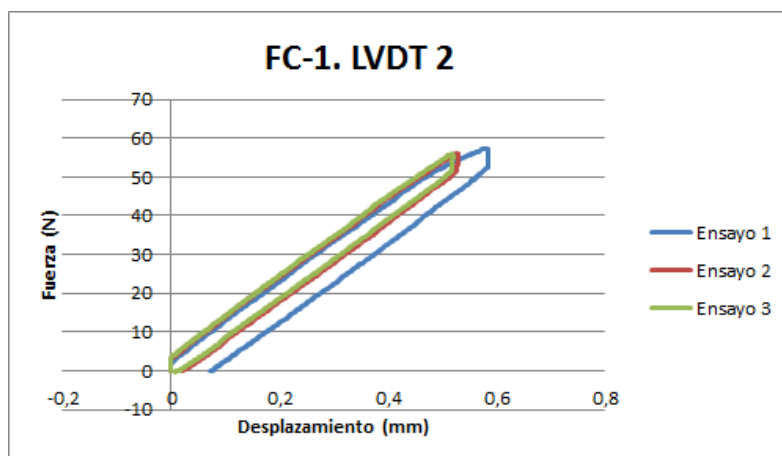


Figura C.46: Ensayo cuasi-estático II-B-FC-2-2

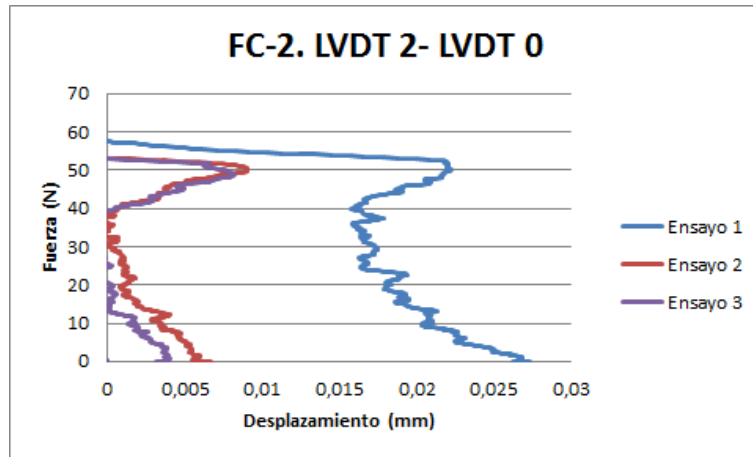


Figura C.47: Ensayo cuasi-estático II-B-FC-2-2-0

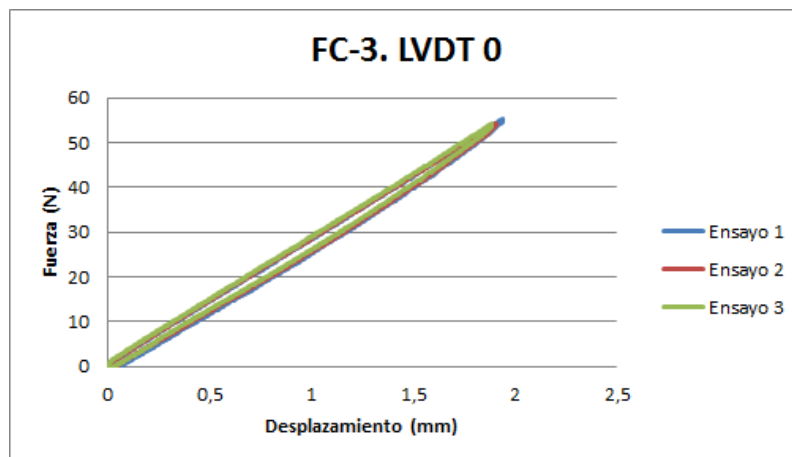


Figura C.48: Ensayo cuasi-estático II-B-FC-3-0

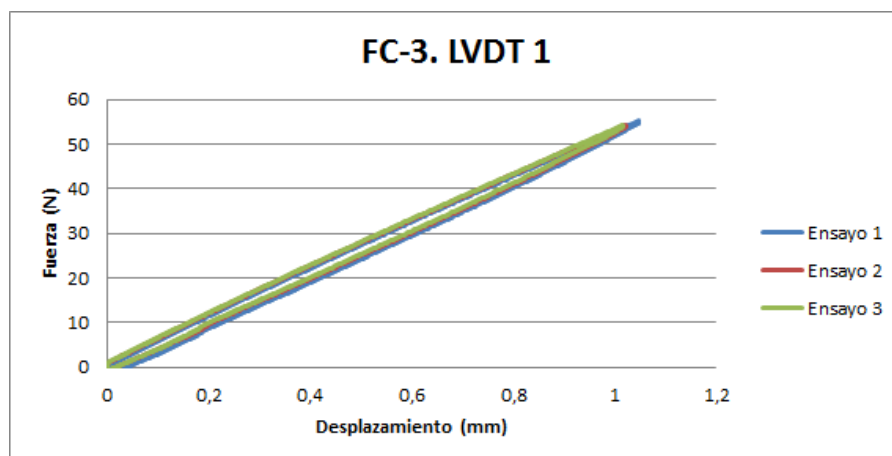


Figura C.49: Ensayo cuasi-estático II-B-FC-3-1

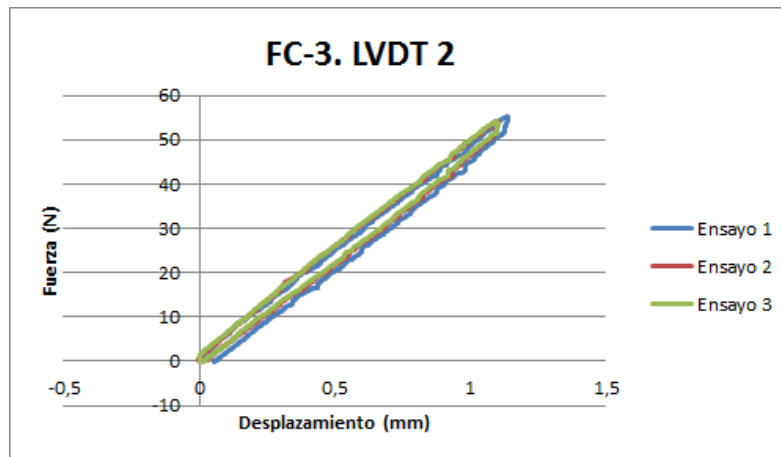


Figura C.50: Ensayo cuasi-estático II-B-FC-3-2

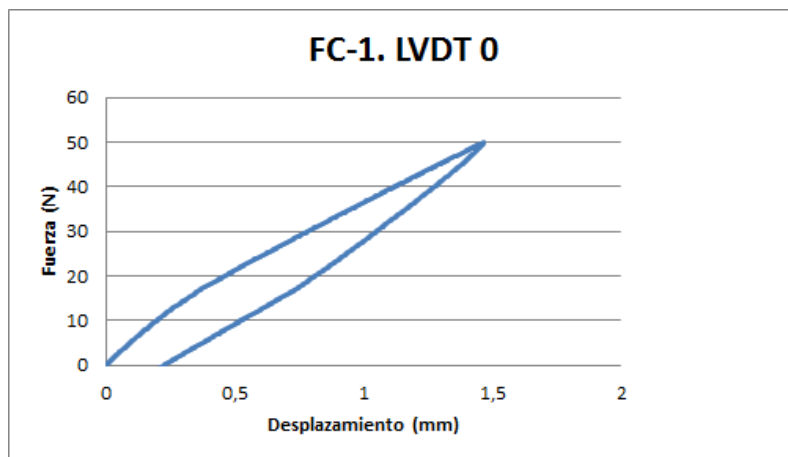


Figura C.51: Ensayo cuasi-estático II-B-FE-0

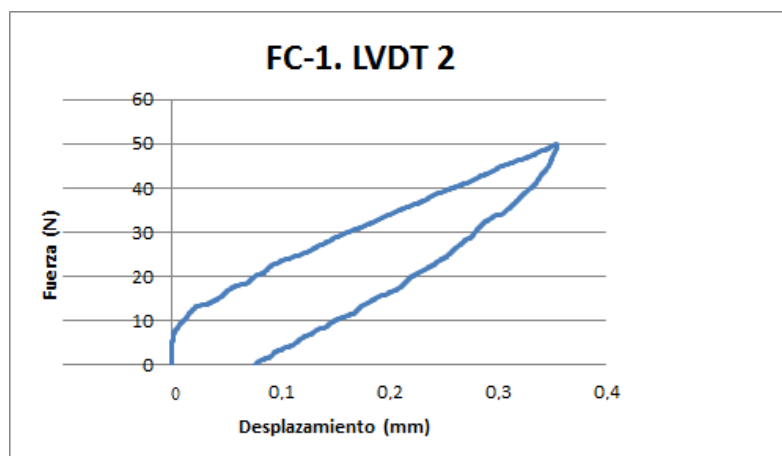


Figura C.52: Ensayo cuasi-estático II-B-FE-2

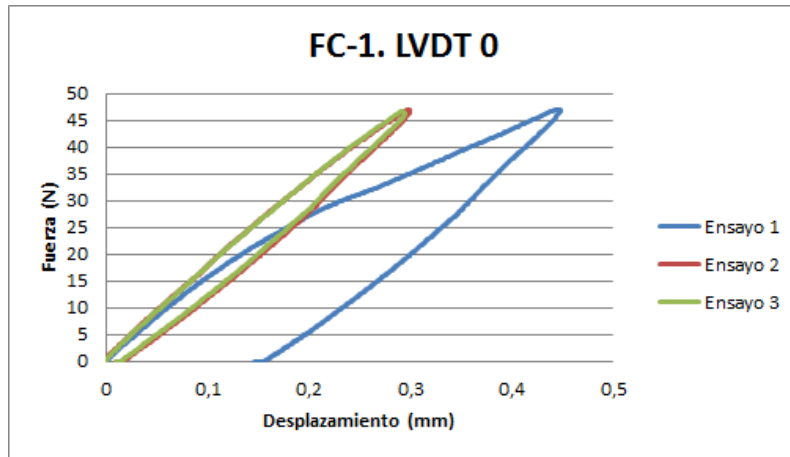


Figura C.53: Ensayo cuasi-estático III-A-FC-1-0

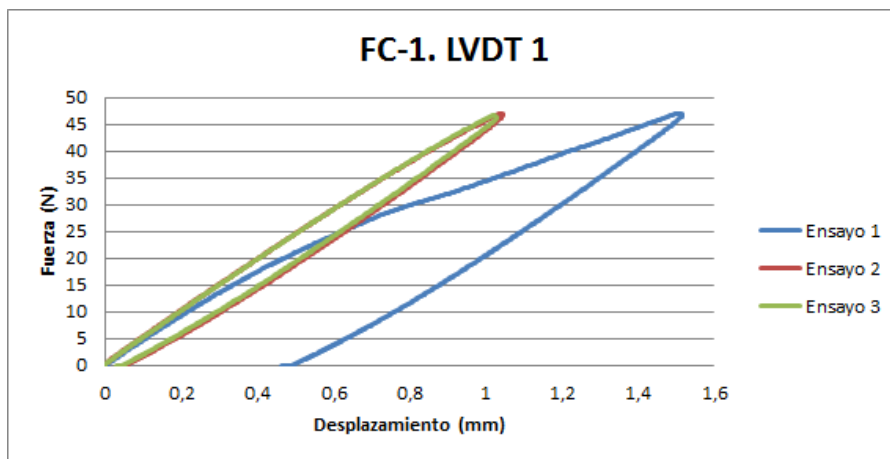


Figura C.54: Ensayo cuasi-estático III-A-FC-1-1

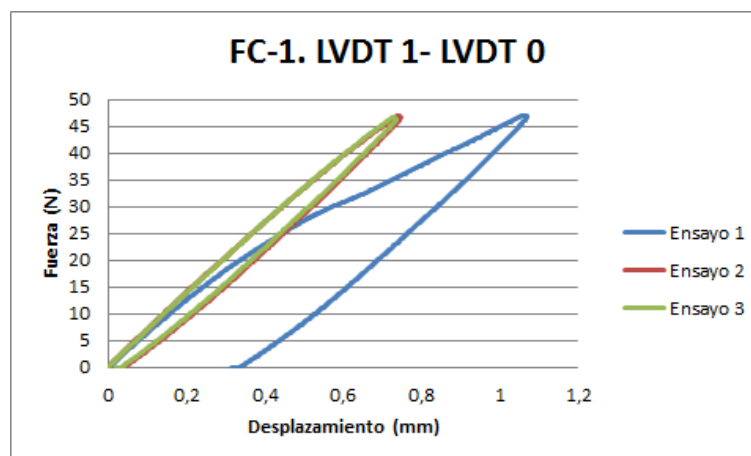


Figura C.55: Ensayo cuasi-estático III-A-FC-1-1-0

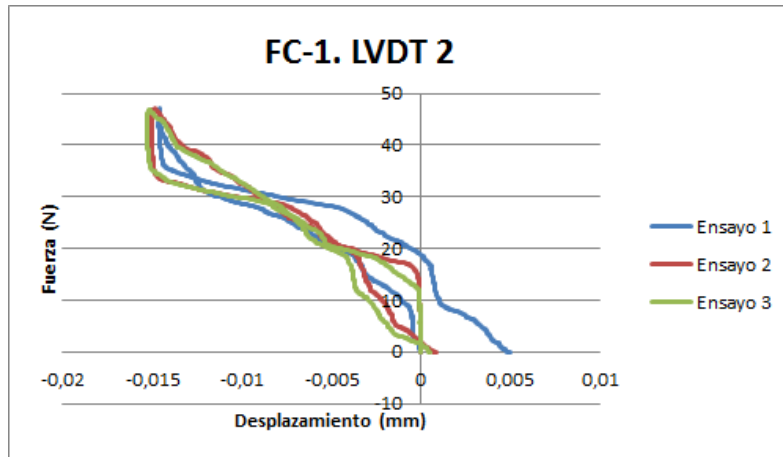


Figura C.56: Ensayo cuasi-estático III-A-FC-1-2

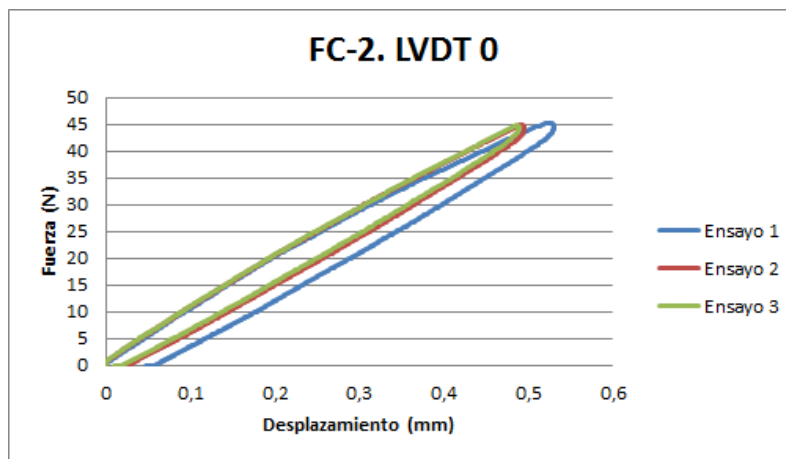


Figura C.57: Ensayo cuasi-estático III-A-FC-2-0

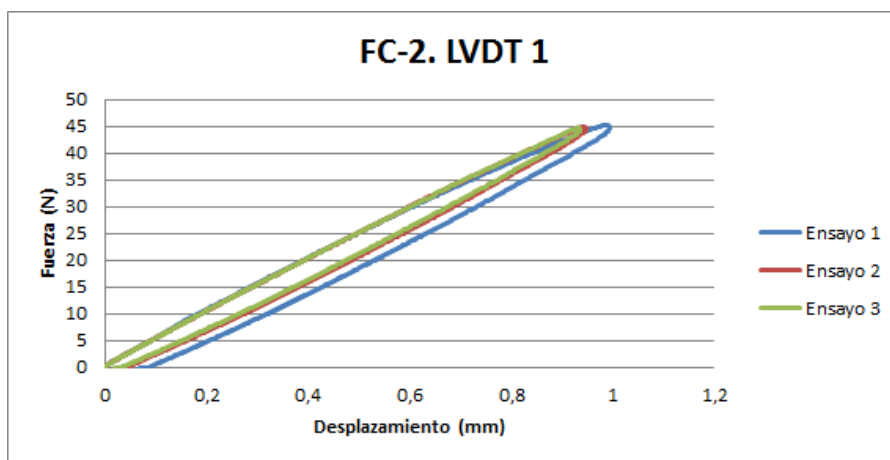


Figura C.58: Ensayo cuasi-estático III-A-FC-2-1

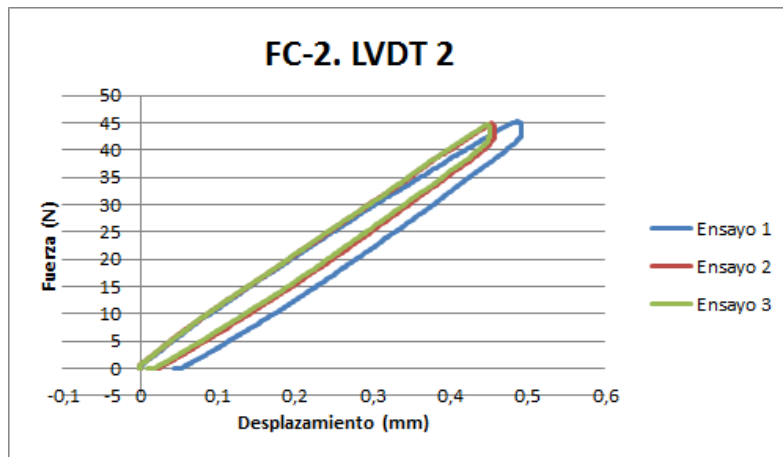


Figura C.59: Ensayo cuasi-estático III-A-FC-2-2

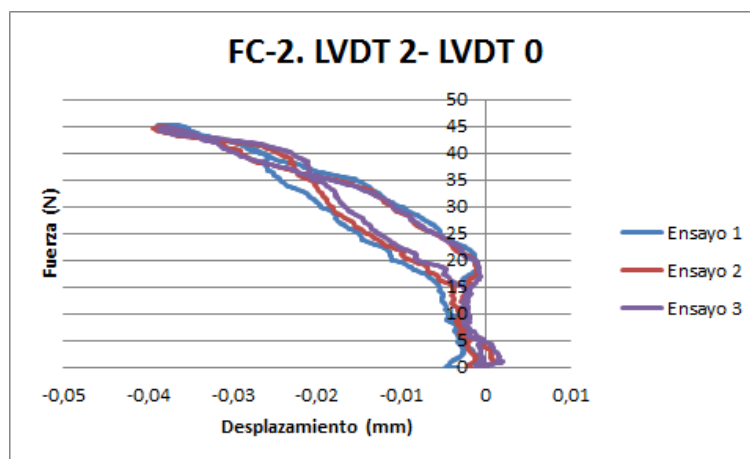


Figura C.60: Ensayo cuasi-estático III-A-FC-2-2-0

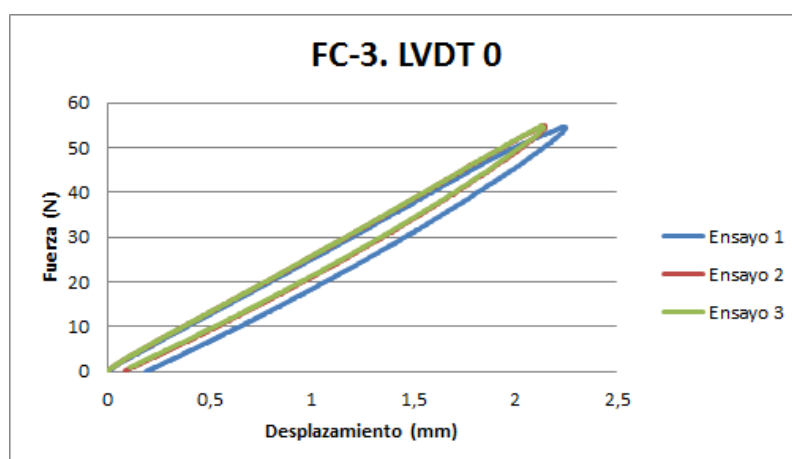


Figura C.61: Ensayo cuasi-estático III-A-FC-3-0

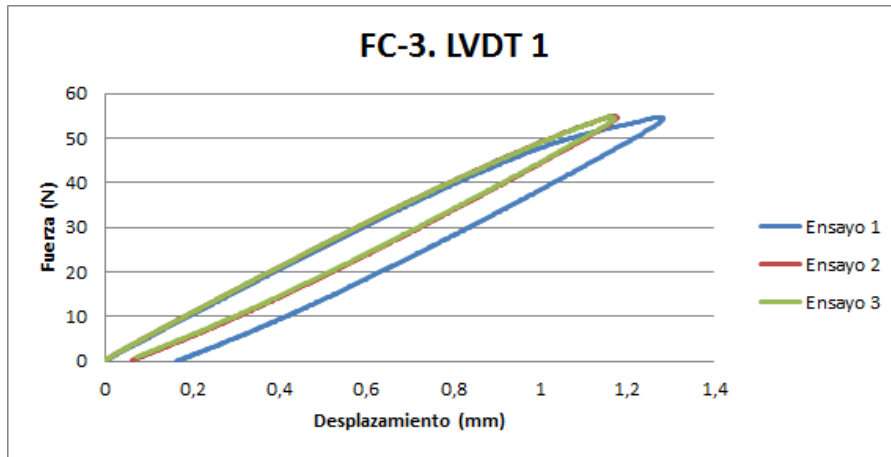


Figura C.62: Ensayo cuasi-estático III-A-FC-3-1

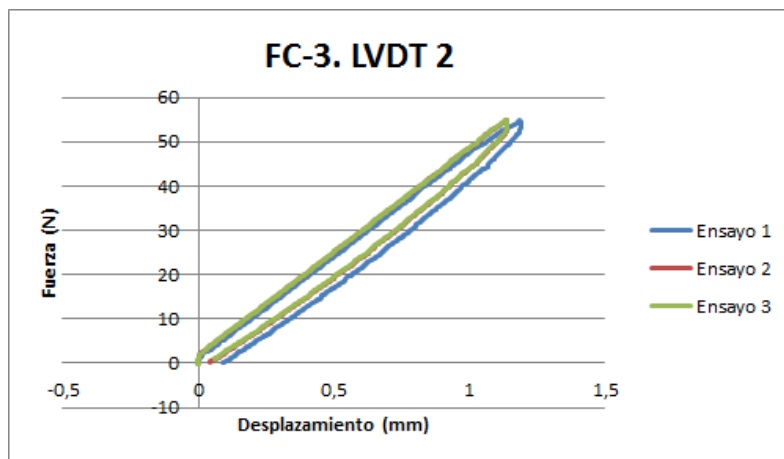


Figura C.63: Ensayo cuasi-estático III-A-FC-3-2

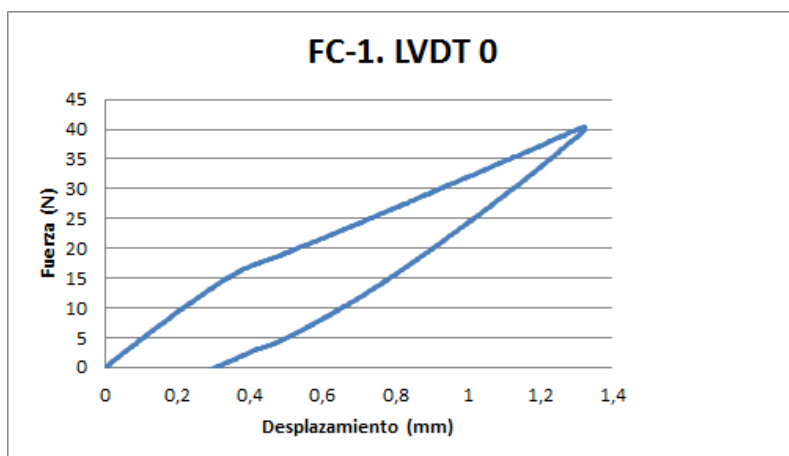


Figura C.64: Ensayo cuasi-estático III-A-FE-0

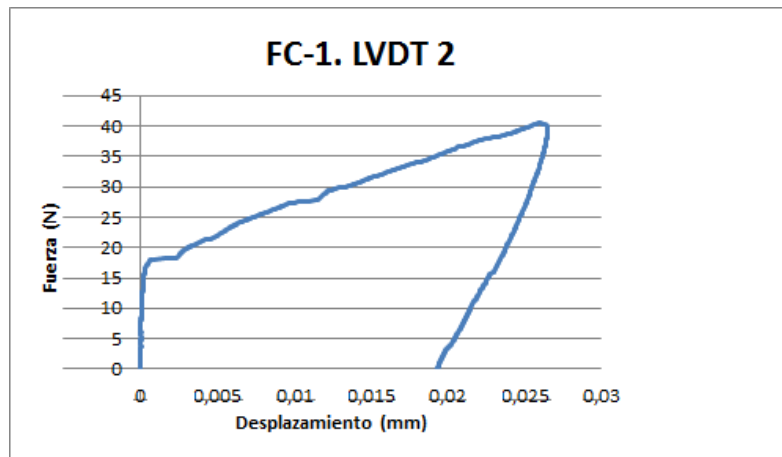


Figura C.65: Ensayo cuasi-estático III-A-FE-2

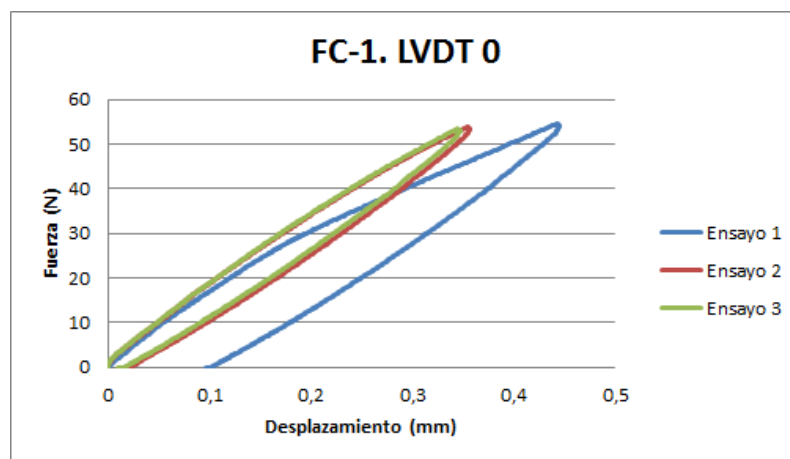


Figura C.66: Ensayo cuasi-estático III-B-FC-1-0

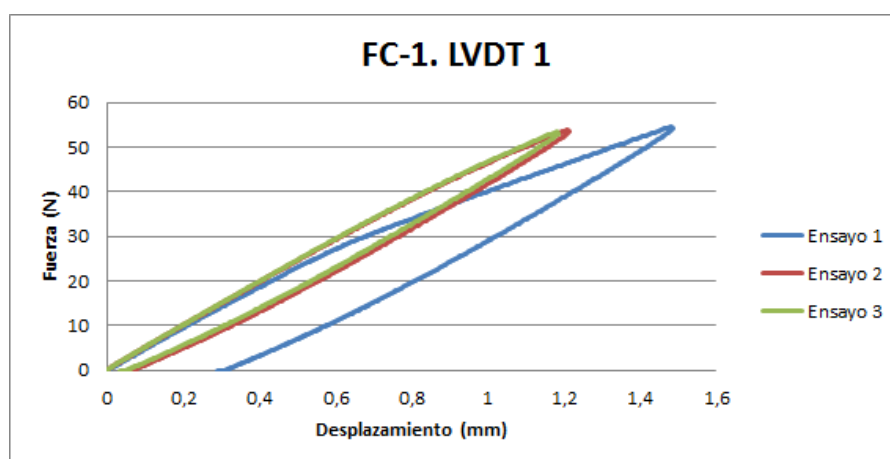


Figura C.67: Ensayo cuasi-estático III-B-FC-1-1

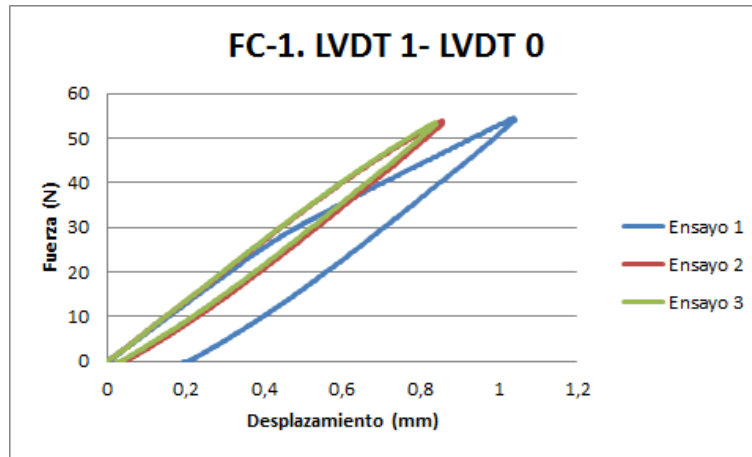


Figura C.68: Ensayo cuasi-estático III-B-FC-1-1-0

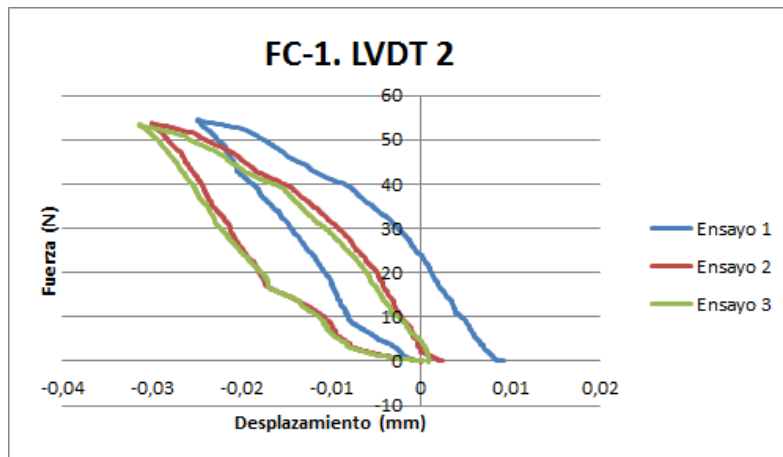


Figura C.69: Ensayo cuasi-estático III-B-FC-1-2

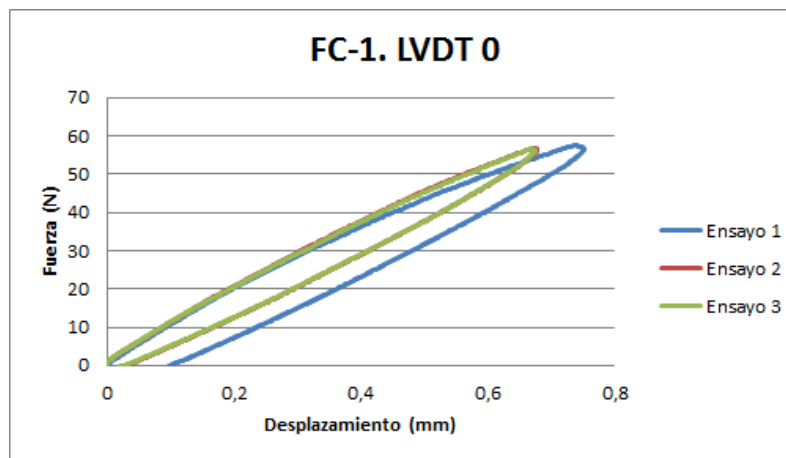


Figura C.70: Ensayo cuasi-estático III-B-FC-2-0

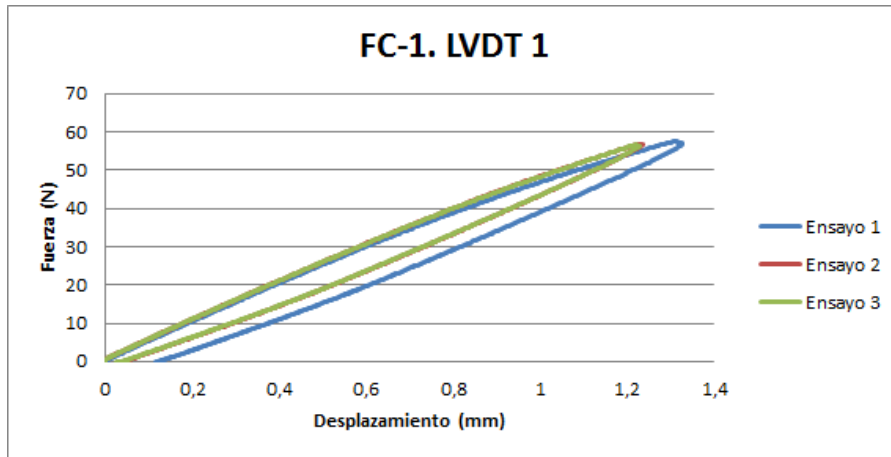


Figura C.71: Ensayo cuasi-estático III-B-FC-2-1

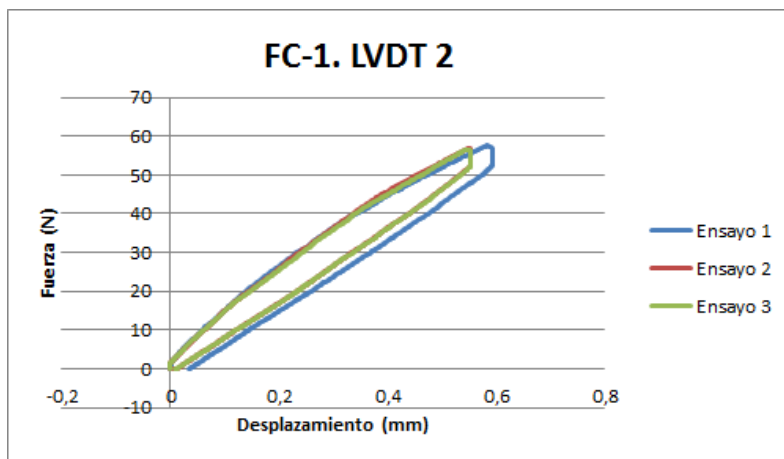


Figura C.72: Ensayo cuasi-estático III-B-FC-2-2

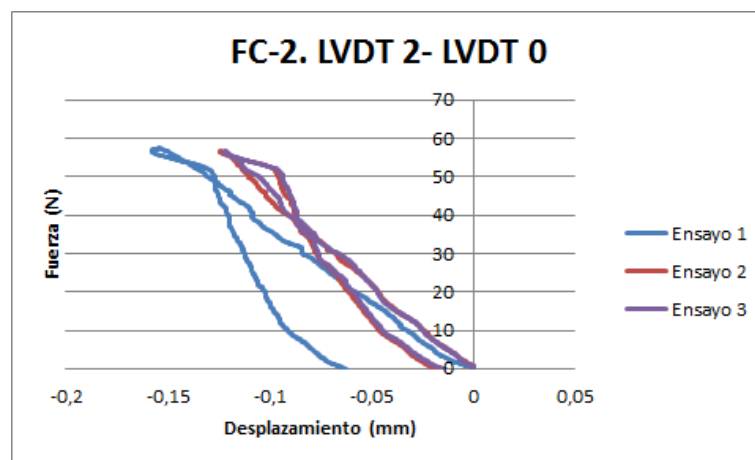


Figura C.73: Ensayo cuasi-estático III-B-FC-2-2-0

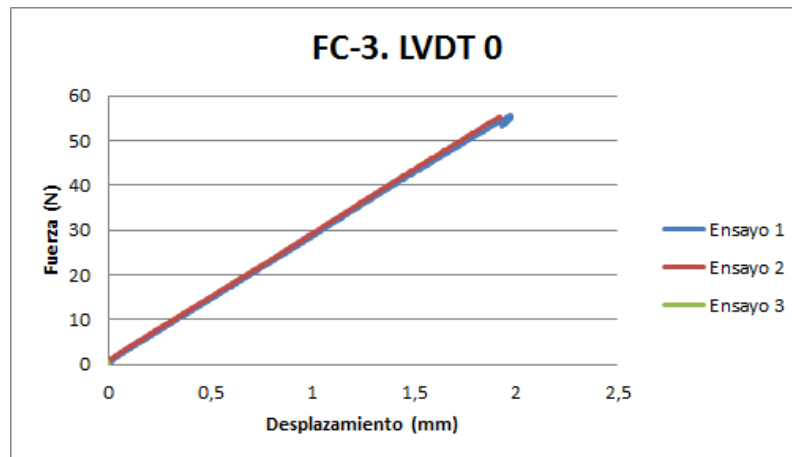


Figura C.74: Ensayo cuasi-estático III-B-FC-3-0

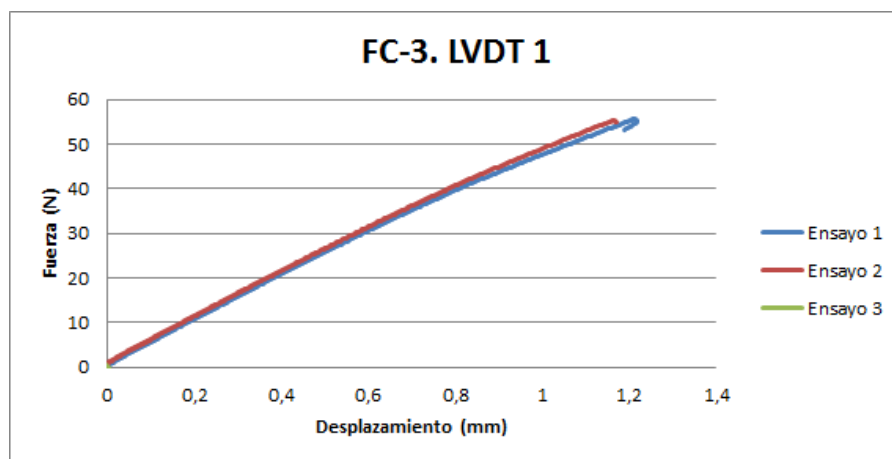


Figura C.75: Ensayo cuasi-estático III-B-FC-3-1

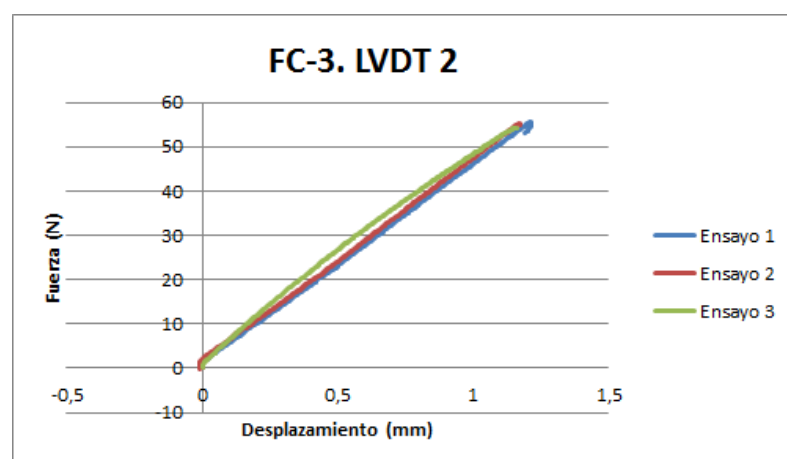


Figura C.76: Ensayo cuasi-estático III-B-FC-3-2

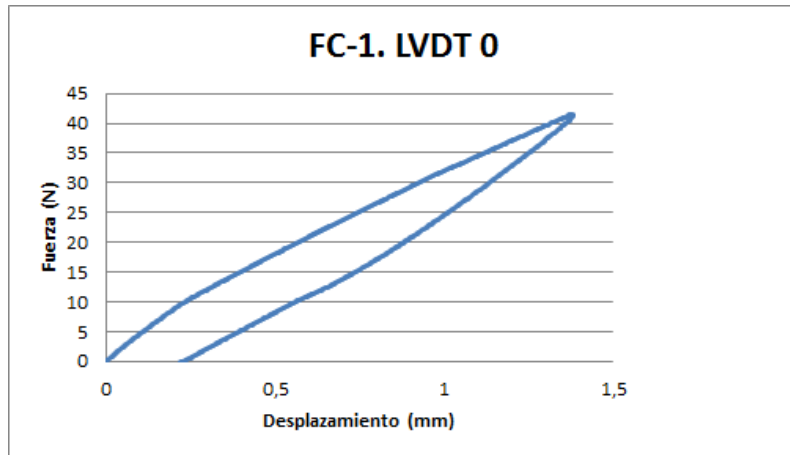


Figura C.77: Ensayo cuasi-estático III-B-FE-0

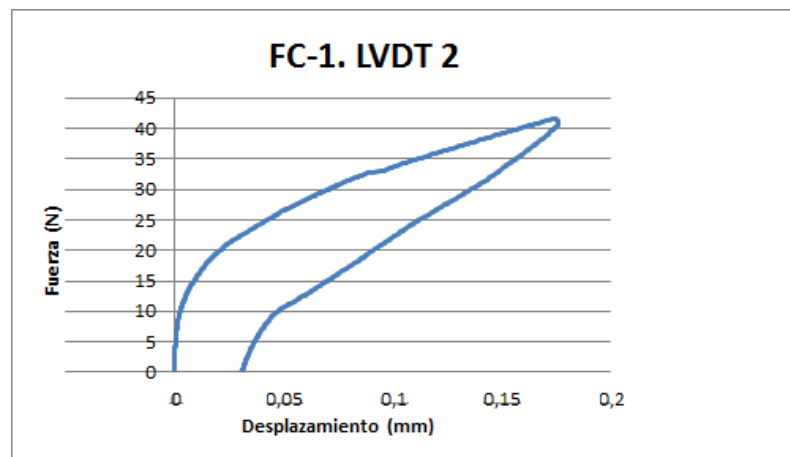


Figura C.78: Ensayo cuasi-estático III-B-FE-2

2. Deformada de las palas

Además, un resultado relevante, sera la deformada de cada una de las palas, por ello procedemos a su exposición a continuación:

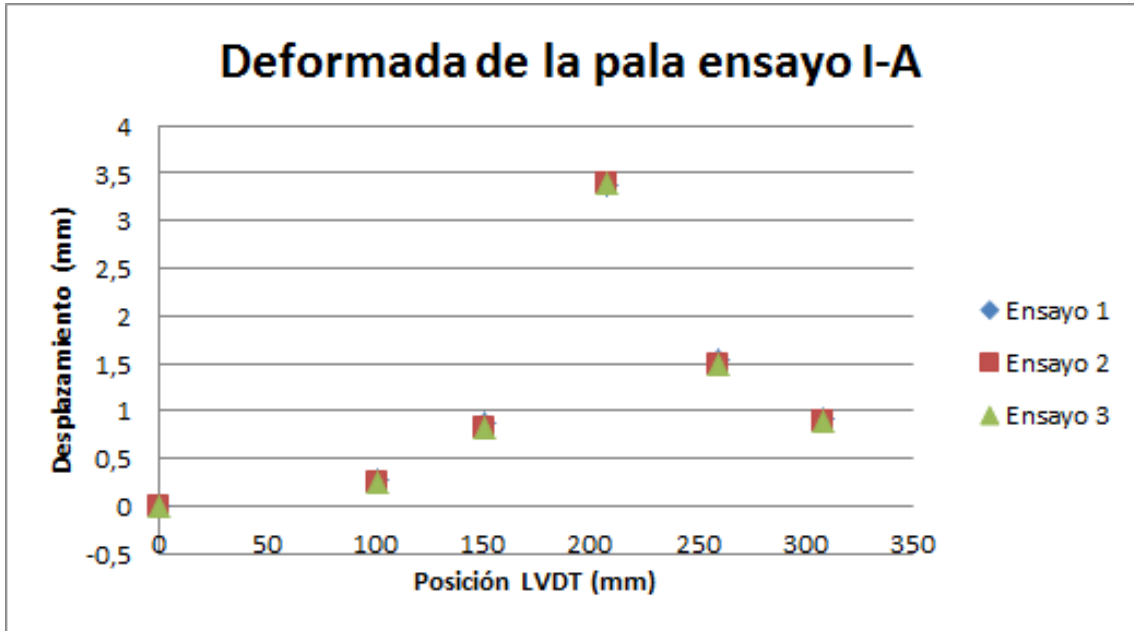


Figura C.79: Deformada obtenida mediante los ensayos de flexión centrada en la pala I-A

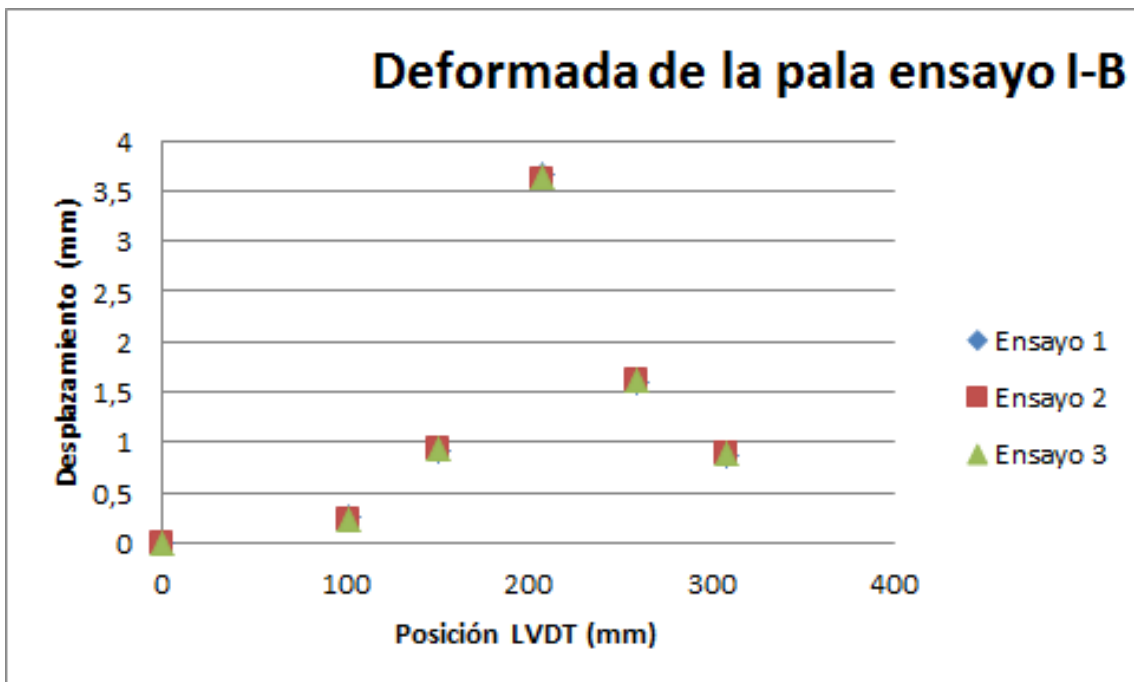


Figura C.80: Deformada obtenida mediante los ensayos de flexión centrada en la pala I-B

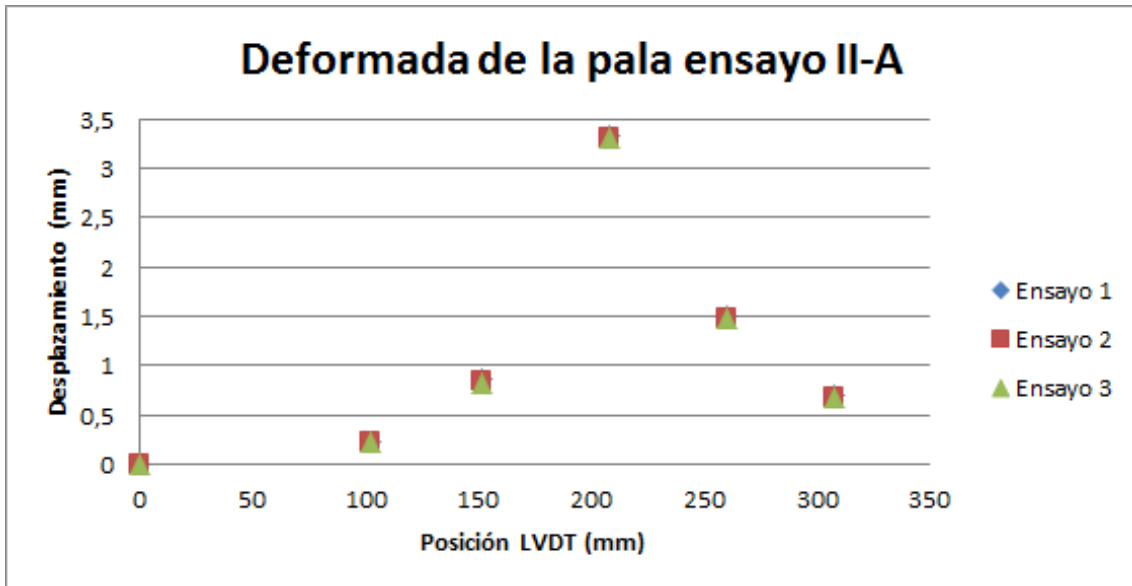


Figura C.81: Deformada obtenida mediante los ensayos de flexión centrada en la pala II-A

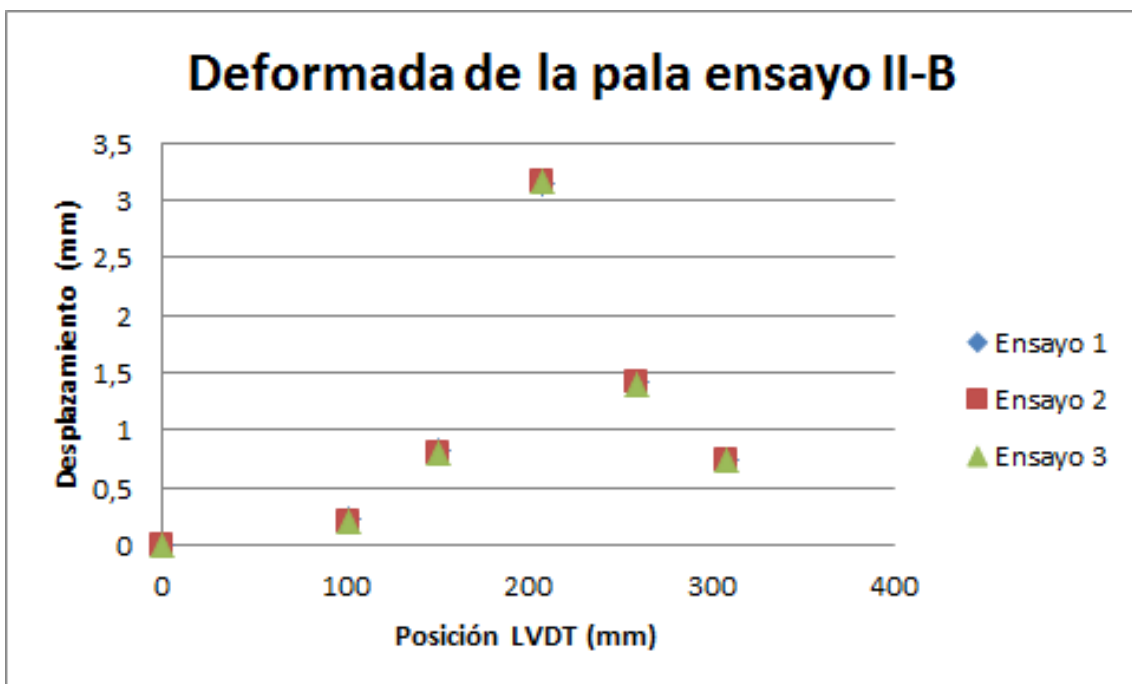


Figura C.82: Deformada obtenida mediante los ensayos de flexión centrada en la pala II-B

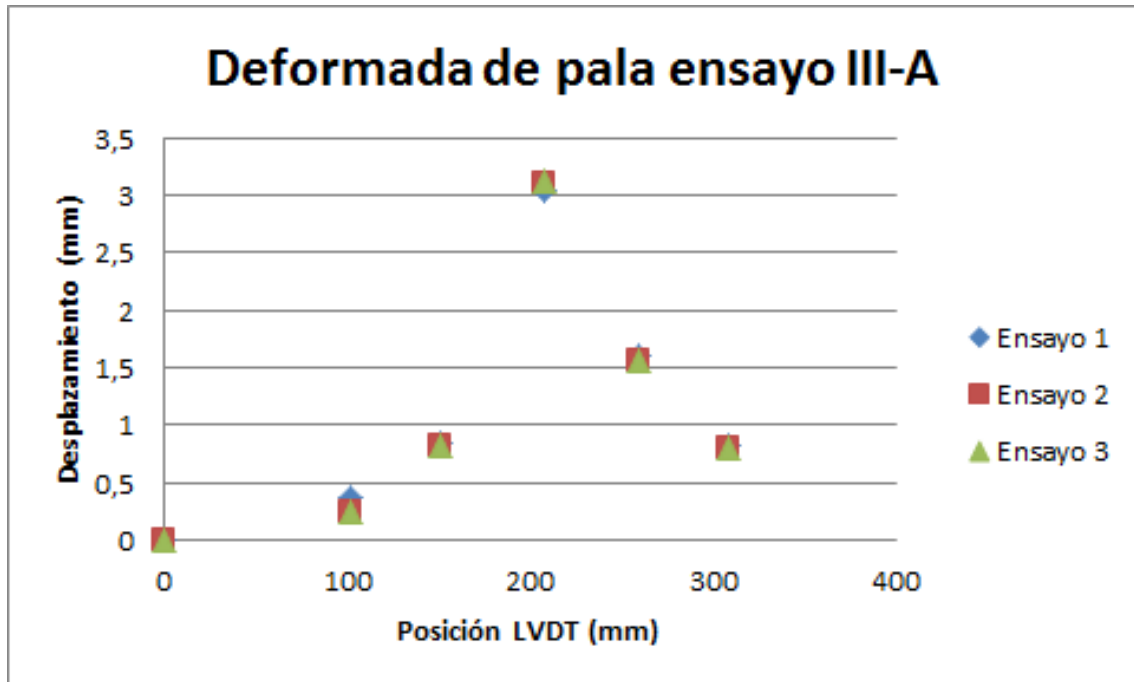


Figura C.83: Deformada obtenida mediante los ensayos de flexión centrada en la pala III-A

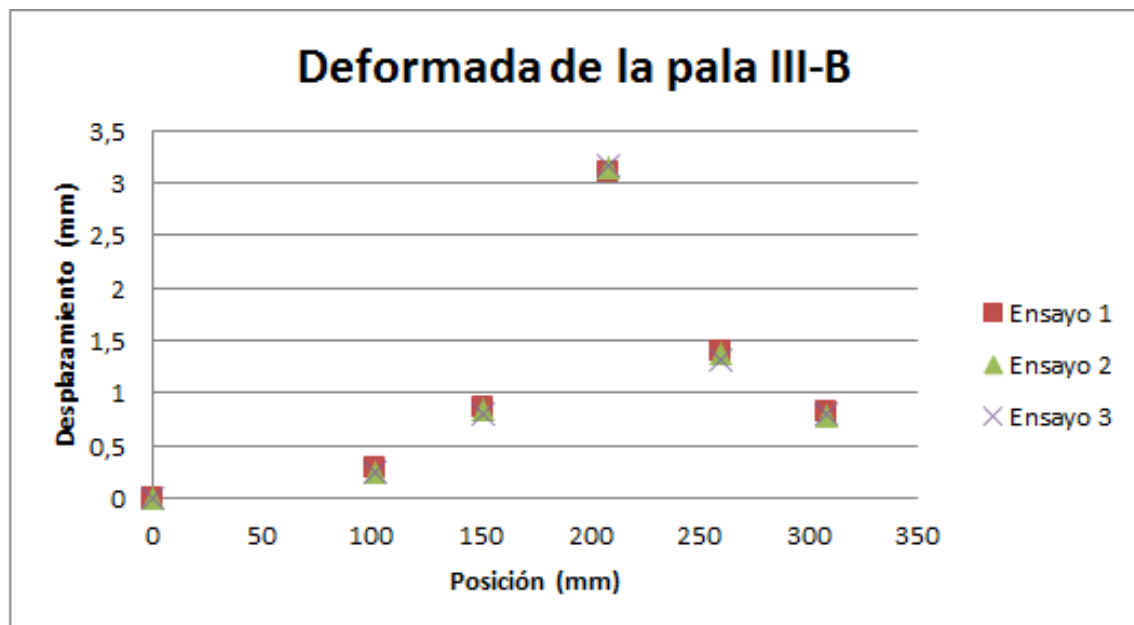


Figura C.84: Deformada obtenida mediante los ensayos de flexión centrada en la pala III-B

Apéndice D

Resultados obtenidos del ensayo de impacto de pala

En este apéndice se expondrán todos los resultados obtenidos de cada pala en el ensayo de impacto que ya han sido comentados en la memoria.

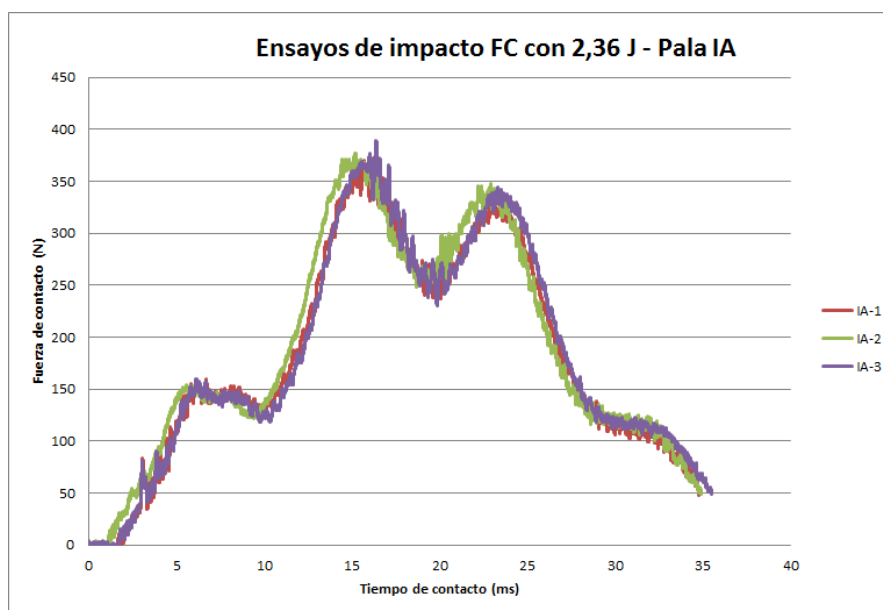


Figura D.1: Resultados obtenidos del ensayo de impacto centrado en la máquina Ceast 9350 - Pala I-A

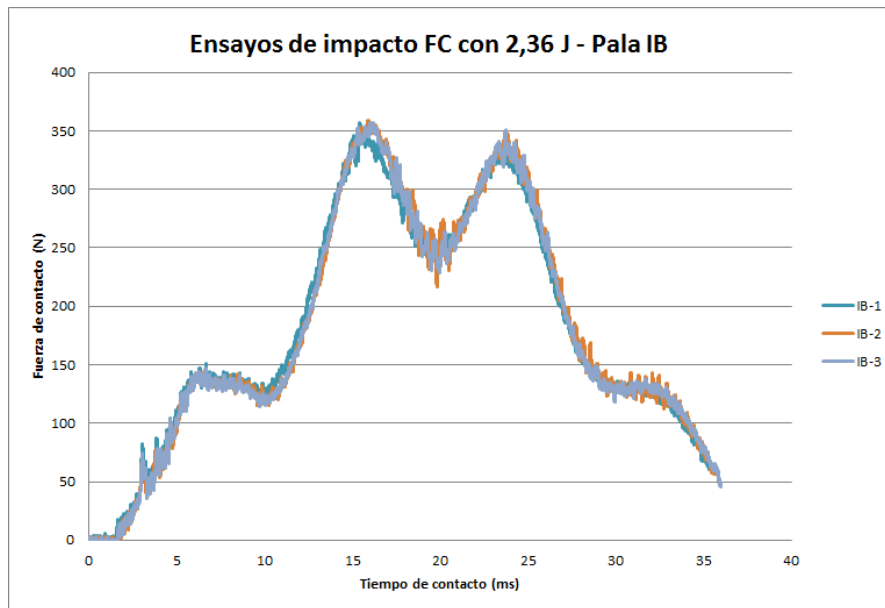


Figura D.2: Resultados obtenidos del ensayo de impacto centrado en la máquina Ceast 9350 - Pala I-B

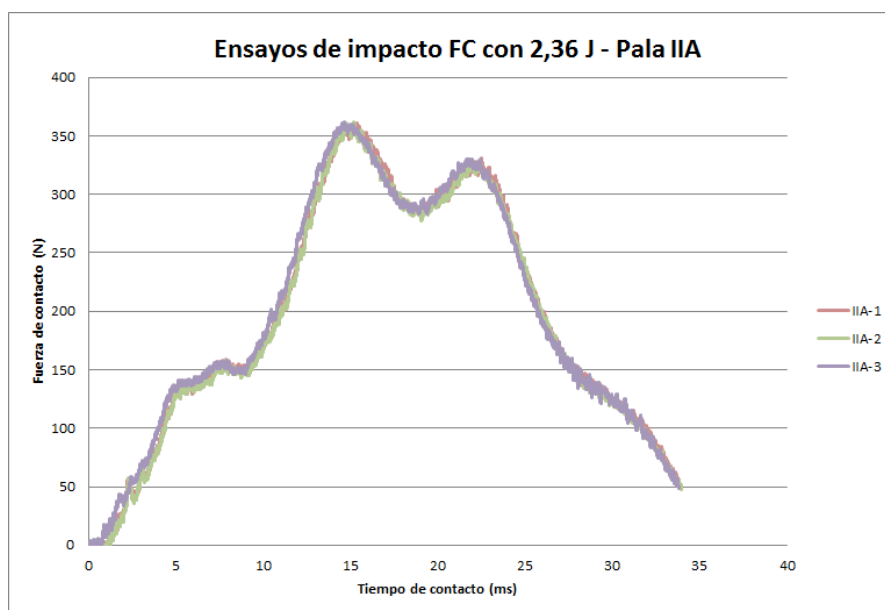


Figura D.3: Resultados obtenidos del ensayo de impacto centrado en la máquina Ceast 9350 - Pala II-A

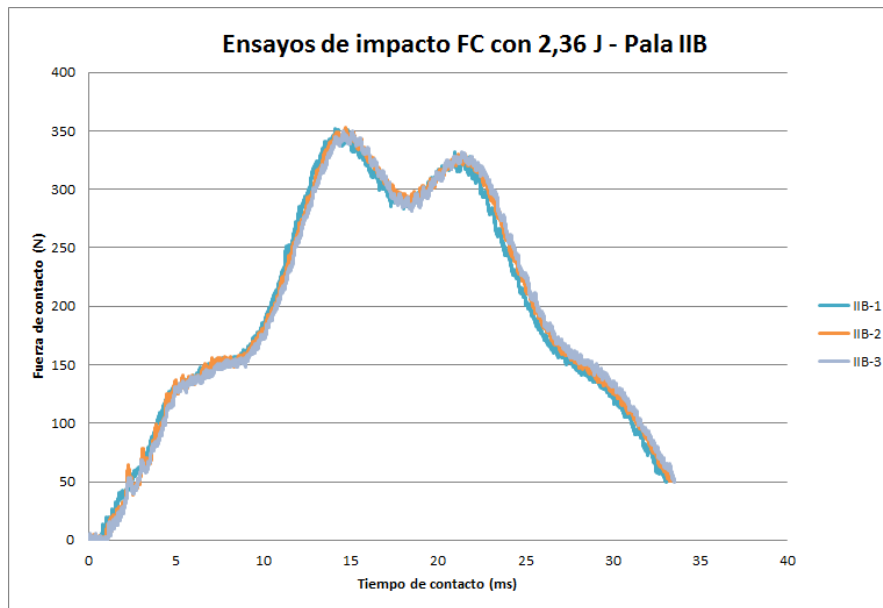


Figura D.4: Resultados obtenidos del ensayo de impacto centrado en la máquina Ceast 9350 - Pala II-B

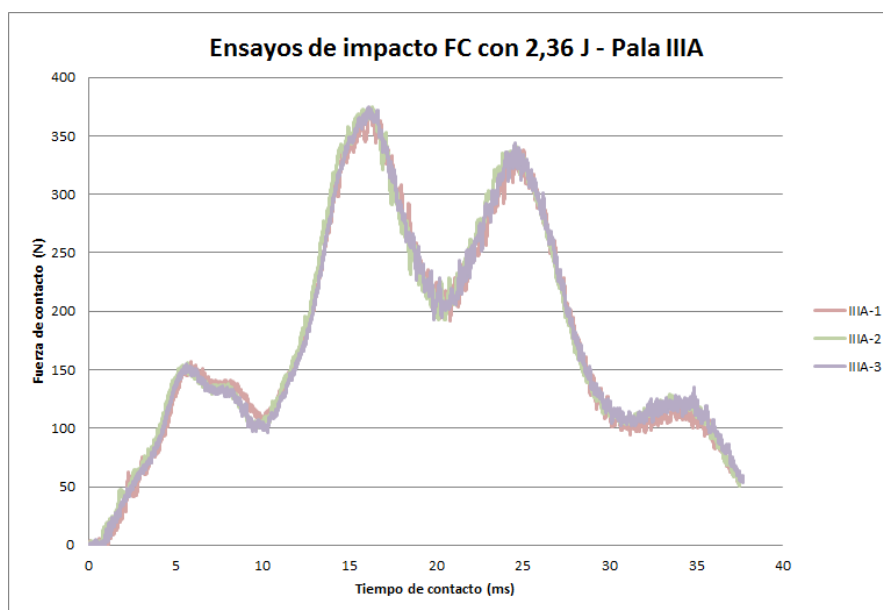


Figura D.5: Resultados obtenidos del ensayo de impacto centrado en la máquina Ceast 9350 - Pala III-A

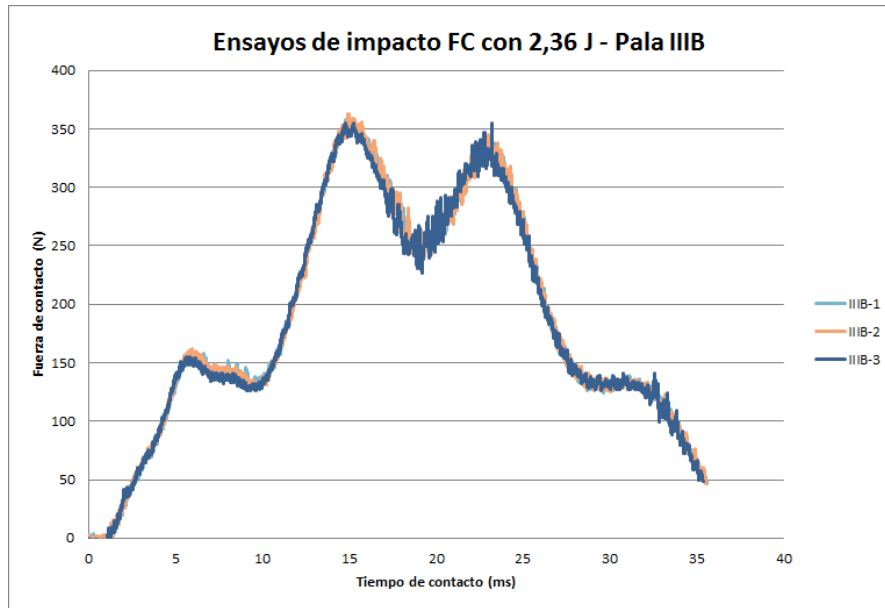
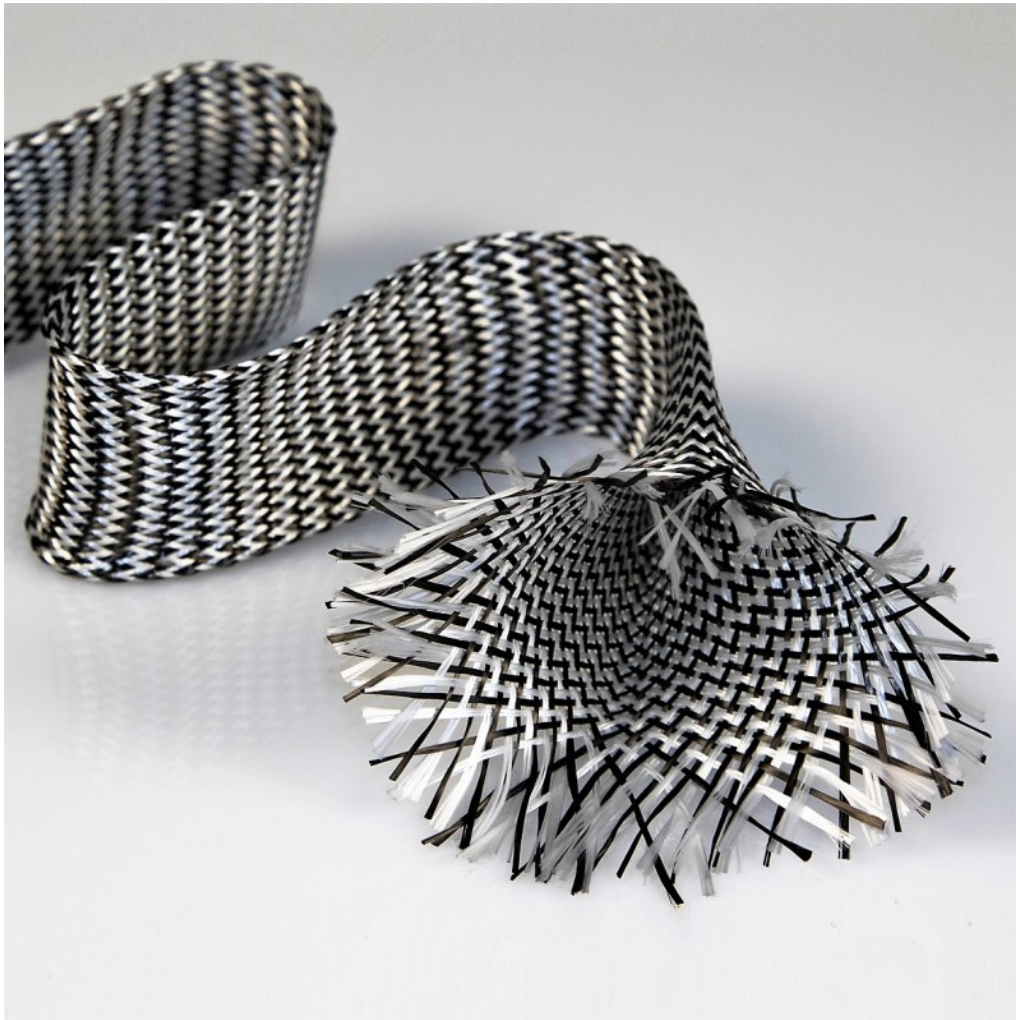


Figura D.6: Resultados obtenidos del ensayo de impacto centrado en la máquina Ceast 9350 - Pala III-B

Apéndice E

Fichas técnicas de materiales empleados

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 pádel y tubos de carbono/vidrio empleando resinas epoxi, uretano-acrílicas y viniléster.

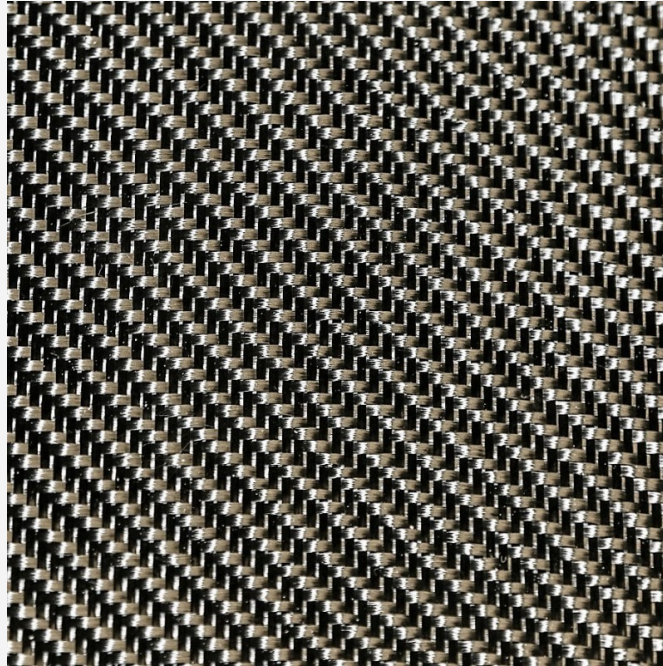
Tipo suministro

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

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

Tejido de carbono sarga 2 x 2 de 3K y 200 g/m² con ensimaje epoxi x 100 m², suministrado enrollado y en caja de cartón



TECHNICAL DATA SHEET <i>Fiche technique</i>		DATE : 13/11/2014
		Number : 1388 Indice : 2
STYLE <i>Reference</i>	3257/01	
FINISH <i>Traitement</i>	F64	
POWDER TYPE <i>Nature de la poudre</i>	EPOXY on one side <i>Epoxy une face</i>	
COMPOSITION Norme ISO 7211-2		
	WARP <i>chaîne</i>	WEFT <i>trame</i>
YARN <i>Fils</i>	TORAY FT300B 3K 40B	TORAY FT300B 3K 40B
COUNT / CM <i>Nombre de fils/cm</i>	4.9 ± 0.1	4.9 ± 0.1
WEAVE <i>Armure</i>	TWILL 2 X 2 <i>(Sergé 2 lie 2)</i>	
FABRIC WEIGHT (g/m²) <i>Masse surfacique</i> Norme ISO 3374	198	± 10
POWDER WEIGHT (g/m²) <i>Poudre déposée</i> Norme ISO 3374	18	± 4
TOTAL WEIGHT (g/m²) <i>Masse surfacique totale</i> Norme ISO 3374	216	± 14
<p>The information contained in this technical data sheet is based on our current experience, values quoted are given for guidance purpose only . PORCHER INDUSTRIES reserve themselves the right to proceed to any modification aiming to improve the quality of their products . Les renseignements de cette fiche technique reposent sur notre expérience actuelle , les valeurs indiquées sont données à titre indicatif . Le GROUPE PORCHER INDUSTRIES se réserve le droit d'apporter à ses produits toutes modifications tendant à améliorer leur qualité .</p>		

This document belongs exclusively to PORCHER INDUSTRIES GROUP-the reproduction is strictly forbidden.
 Ce document est la propriété exclusive du GROUPE PORCHER INDUSTRIES : sa reproduction est strictement interdite

Properties	Status	Norm	Unit	Average	Min	Max
General						
Thickness	**	ISO-1923	mm	40,00	37,60	42,40
Area weight	**	Internal	g/m ²	1120	940	1300
Apparent density	**	ISO-845	kg/m ³	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

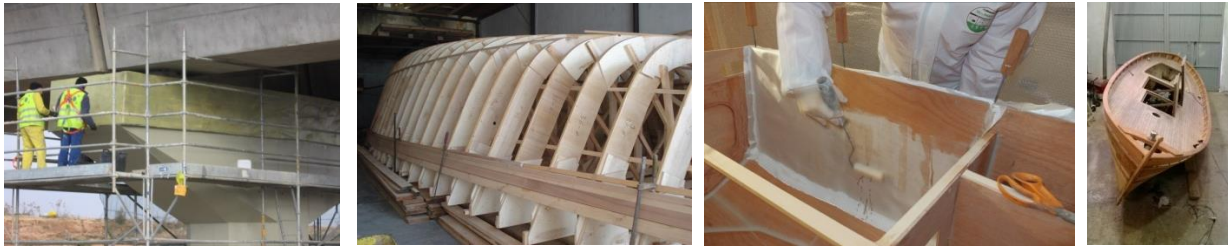
Polietileno reticulado modificado con componente EVA (28 kg/m³) espesor 36 mm

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.

TORAYCA® T300 DATA SHEET

Baseline carbon fiber used in aerospace applications. Has 30 year production history and is known for its balanced composite properties, high quality, consistency, reliability and supplyability.

FIBER PROPERTIES

	English	Metric	Test Method
Tensile Strength	512 ksi	3,530 MPa	TY-030B-01
Tensile Modulus	33.4 Msi	230 GPa	TY-030B-01
Strain	1.5 %	1.5 %	TY-030B-01
Density	0.064 lbs/in ³	1.76 g/cm ³	TY-030B-02
Filament Diameter	2.8E-04 in.	7 µm	
Yield			
1K	22,568 ft/lbs	66 g/1000m	TY-030B-03
3K	7,523 ft/lbs	198 g/1000m	TY-030B-03
6K	3,761 ft/lbs	396 g/1000m	TY-030B-03
12K	1,862 ft/lbs	800 g/1000m	TY-030B-03
Sizing Type	40A, 40B	1.0 %	TY-030B-05
& Amount	40D	0.7 %	TY-030B-05
	50A, 50B	1.0 %	TY-030B-05
Twist	Twisted, Untwisted, or Never twisted		

FUNCTIONAL PROPERTIES

CTE	-0.41 $\alpha \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Specific Heat	0.19 Cal/g $\cdot^{\circ}\text{C}$
Thermal Conductivity	0.025 Cal/cm $\cdot\text{s}\cdot^{\circ}\text{C}$
Electric Resistivity	1.7 x 10 ⁻³ $\Omega \cdot \text{cm}$
Chemical Composition: Carbon	93 %
Na + K	<50 ppm

COMPOSITE PROPERTIES *

Tensile Strength	270 ksi	1,860 MPa	ASTM D-3039
Tensile Modulus	20.0 Msi	135 GPa	ASTM D-3039
Tensile Strain	1.3 %	1.3 %	ASTM D-3039
Compressive Strength	215 ksi	1,470 MPa	ASTM D-695
Flexural Strength	260 ksi	1,810 MPa	ASTM D-790
Flexural Modulus	18.0 Msi	125 GPa	ASTM D-790
ILSS	14 ksi	10 kgf/mm ²	ASTM D-2344
90° Tensile Strength	11.0 ksi	76 MPa	ASTM D-3039

* Toray 250°F Epoxy Resin. Normalized to 60% fiber volume.

TORAY CARBON FIBERS AMERICA, INC.

T300

COMPOSITE PROPERTIES **

Tensile Strength	255 ksi	1,760 MPa	ASTM D-3039
Tensile Modulus	19.5 Msi	130 GPa	ASTM D-3039
Tensile Strain	1.3 %	1.3 %	ASTM D-3039
Compressive Strength	230 ksi	1,570 MPa	ASTM D-695
Compressive Modulus	18.5 Msi	125 GPa	ASTM D-695
In-Plane Shear Strength	14 ksi	98 MPa	ASTM D-3518
ILSS	15.5 ksi	11 kgf/mm ²	ASTM D-2344
90° Tensile Strength	11.5 ksi	80 MPa	ASTM D-3039

** Toray Semi-Toughened 350°F Epoxy Resin. Normalized to 60% fiber volume.

See Section 4 for Safety & Handling information. The above properties do not constitute any warranty or guarantee of values.

These values are for material selection purposes only. For applications requiring guaranteed values, contact our sales and technical team to establish a material specification document.

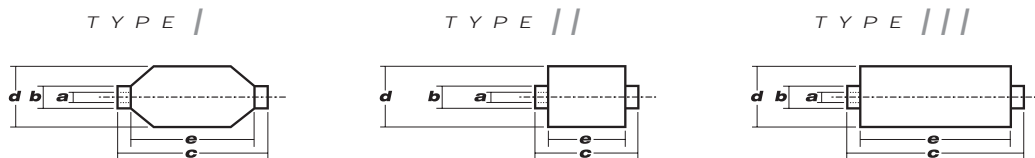
PACKAGING

The table below summarizes the tow sizes, twists, sizing types, and packaging available for standard material. Other bobbin sizes may be available on a limited basis.

Tow Sizes	Twist ¹	Sizing	Bobbin Net Weight (kg)	Bobbin Type ²	Bobbin Size (mm)					Spools per Case	Case Net Weight (kg)
					a	b	c	d	e		
1K	A	40A, 50A	1.0	I	94	99	320	135	260	15	15
	A	40A, 50A	1.0	II	76	82	192	132	156	16	16
	B	50B	1.0	II	76	82	192	132	156	16	16
3K	A	40A, 50A	2.0	II	76	82	192	157	156	12	24
	B	40B, 50B	2.0	II	76	82	192	157	156	12	24
6K	A	40D, 50A	2.0	II	76	82	192	157	156	12	24
	B	40D, 50B	2.0	II	76	82	192	157	156	12	24
12K	A	50A	4.0	II	76	82	192	204	156	6	24
	B	50B	4.0	II	76	82	192	204	156	6	24

¹ **Twist** A: Twisted yarn B: Untwisted yarn made from a twisted yarn through an untwisting process

² **Bobbin Type** See Diagram below



TORAY CARBON FIBERS AMERICA, INC.




6 Hutton Centre Drive, Suite #1270, Santa Ana, CA 92707 TEL: (714) 431-2320 FAX: (714) 424-0750
 Sales@Toraycfa.com Technical@Toraycfa.com www.torayusa.com




Apéndice F

Catálogo Shark Pádel




TARIFA DE
 PRECIOS
 PALAS

CÓDIGO	IMAGEN	DESCRIPCION	COLORES
05SH 59002		<p>PALA MARVEL SPAIN F300</p> <p>GAMA MEDIA-ALTA</p> <p>COMPOSICION 35 % CARBONO 65 % FIFRA VIDRIO</p> <p>PUÑO DE LA PALA: 100 % CARBONO.</p> <p>CARA DE LA PALA: TRICAPA FIBRA VIDRIO 200.</p> <p>TUBULAR MALLA DE CARBONO 40 mm.</p> <p>GOMA SANDWICH POLIETILENO CON EVA, 28 kg.</p> <p>PESOS: 350-360 gr // 360-365 gr // 365-370 gr.</p> <p>POTENCIA 90 - CONTROL 70.</p>	COLORES
05SH 59003		<p>PALA FANTASY SPAIN F300</p> <p>GAMA MEDIA-ALTA</p> <p>COMPOSICION 35 % CARBONO 65 % FIFRA VIDRIO</p> <p>PUÑO DE LA PALA: 100 % CARBONO.</p> <p>CARA DE LA PALA: TRICAPA FIBRA VIDRIO 200.</p> <p>TUBULAR MALLA DE CARBONO 40 mm.</p> <p>GOMA SANDWICH POLIETILENO CON EVA, 28 kg.</p> <p>PESOS: 350-360 gr // 360-365 gr.</p> <p>POTENCIA 90 - CONTROL 70.</p>	COLORES
05SH 59004		<p>PALA FORCE SPAIN M300</p> <p>GAMA ALTA</p> <p>COMPOSICION 65 % CARBONO 35 % FIFRA VIDRIO</p> <p>PUÑO DE LA PALA: 100 % CARBONO.</p> <p>CARA DE LA PALA: MONOCAPA CARBONO 200 - BICAPA FIBRA VIDRIO 80.</p> <p>TUBULAR MALLA DE CARBONO 40 mm.</p> <p>GOMA SANDWICH POLIETILENO CON EVA, 28 kg.</p> <p>PESOS: 350-360 gr // 360-365 gr.</p> <p>POTENCIA 90 - CONTROL 80.</p>	COLORES

		<p>PALA GREEN SPAIN M300</p> <p>GAMA ALTA</p> <p>COMPOSICION 65 % CARBONO 35 % FIFRA VIDRIO</p> <p>PUÑO DE LA PALA: 100 % CARBONO.</p> <p>CARA DE LA PALA: MONOCAPA CARBONO 200 - BICAPA FIBRA VIDRIO 200.</p> <p>TUBULAR MALLA DE CARBONO 40 mm.</p> <p>GOMA SANDWICH POLIETILENO CON EVA, 28 kg.</p> <p>PESOS: 350-360 gr // 360-365 gr // 365-370 gr.</p> <p>POTENCIA 85 - CONTROL 85.</p>	<p>COLORES</p>
		<p>PALA BLACK SPAIN X300</p> <p>GAMA ALTA</p> <p>COMPOSICION 80 % CARBONO 20 % FIFRA VIDRIO</p> <p>PUÑO DE LA PALA: 100 % CARBONO.</p> <p>CARA DE LA PALA: BICAPA CARBONO 200 - MONOCAPA FIBRA VIDRIO 80.</p> <p>TUBULAR MALLA DE CARBONO 40 mm.</p> <p>GOMA SANDWICH POLIETILENO CON EVA, 28 kg.</p> <p>PESOS: 360-365 gr // 365-370 gr.</p> <p>POTENCIA 90 - CONTROL 95.</p>	<p>COLORES</p>
		<p>PALA HORNET SPAIN W300</p> <p>GAMA ALTA</p> <p>COMPOSICION 100 % CARBONO.</p> <p>PUÑO DE LA PALA: 100 % CARBONO.</p> <p>CARA DE LA PALA: TRICAPA CARBONO 200.</p> <p>TUBULAR MALLA DE CARBONO 40 mm.</p> <p>GOMA SANDWICH POLIETILENO CON EVA, 28 kg.</p> <p>PESOS: 360-365 gr // 365-370 gr // 370-375 gr.</p> <p>POTENCIA 90 - CONTROL 95.</p>	<p>COLORES</p>
<p>05SH 59008</p>	<p>05SH 59005</p>	<p>05SH 59006</p>	



<p>05SH 59007</p>		<p>PALA WASP SPAIN WT300</p> <p>GAMA ALTA COMPOSICION 100 % CARBONO. PUÑO DE LA PALA: 100 % CARBONO. CARA DE LA PALA: TRICAPA CARBONO 200. TUBULAR MALLA DE CARBONO 40 mm. GOMA SANDWICH POLIETILENO CON EVA, 28 kg. PESOS: 360-365 gr // 365-370 gr // 370-375 gr. POTENCIA 90 - CONTROL 95.</p>	<p>COLORES</p>	
-----------------------	---	---	----------------	--

Apéndice G

Hoja de calibración de los LVDT

Form No: 502214 11PV CALIBRATION SHEET



**TRANSDUCER & ELECTRONIC
 CALIBRATION SHEET**

Date: 21/04/2016 Customer Reference MEDEL CACENA S.A. SO015753

Transducer Type: AXR/2.5/S Serial No. M926214AJ16-02

Conditioner Type: BICM Serial No. N/A

Error Limit: 0.3 %

STROKE: (mm)	IDEAL	ACTUAL:	Error (% FS)
-2.500	-10.000	-9.999	0.01
-2.000	-8.000	-7.987	0.07
-1.500	-6.000	-5.972	0.14
-1.000	-4.000	-3.963	0.19
-0.500	-2.000	-1.967	0.16
0.000	0.000	-0.019	-0.10
0.500	2.000	2.007	0.04
1.000	4.000	3.999	-0.01
1.500	6.000	6.001	0.00
2.000	8.000	8.003	0.01
2.500	10.000	10.000	0.00

11 POINT CALIBRATION CERTIFICATE

Calibrated By: A.PIPER

SIGNED A. PIPER

EQUIPMENT	SERIAL No.	CALIBRATION EXPIRY DATE
LE25	ID3481	18/06/16
DVM	ID2732	07/07/16
PL320QMD	ID3651	13/07/16

Solartron Metrology Ltd., Steyning Way, Bognor Regis, West Sussex. PO22 9ST UK Tel +44(0) 1243 833300 Fax +44(0) 1243 861244
 Web: www.solartronmetrology.com

Solartron Metrology Ltd, Registered in England No. 04220056, 2 New Star Road, Leicester, LE4 9JQ

Form No: **502214** **11PV CALIBRATION SHEET**



**TRANSDUCER & ELECTRONIC
 CALIBRATION SHEET**

Date: 21/04/2016 Customer Reference MEDEL CACENA S.A.

SO015753

Transducer Type: AXR/2.5/S

Serial No. M926214AJ16-01

Conditioner Type: BCM

Serial No. N/A

Error Limit: 0.3 %

STROKE: (mm)	IDEAL	ACTUAL:	Error (% FS)
-2.500	-10.000	-10.000	0.00
-2.000	-8.000	-7.986	0.07
-1.500	-6.000	-5.970	0.15
-1.000	-4.000	-3.960	0.20
-0.500	-2.000	-1.965	0.18
0.000	0.000	0.022	0.11
0.500	2.000	2.009	0.05
1.000	4.000	4.000	0.00
1.500	6.000	6.003	0.02
2.000	8.000	8.008	0.04
2.500	10.000	10.008	0.04

11 POINT CALIBRATION CERTIFICATE

Calibrated By: A.PIPER

SIGNED A. Piper

EQUIPMENT	SERIAL No.	CALIBRATION EXPIRY DATE
LE25	ID3481	18/06/16
DVM	ID2732	07/07/16
PL320QMD	ID3651	13/07/16

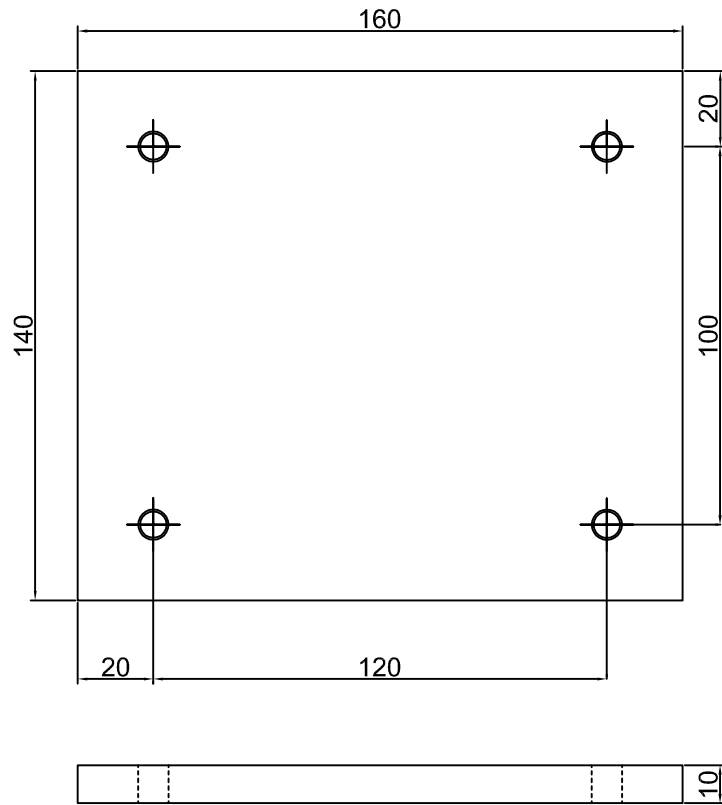
Solartron Metrology Ltd., Steyning Way, Bognor Regis, West Sussex. PO22 9ST UK Tel +44(0) 1243 833300 Fax +44(0) 1243 861244
 Web: www.solartronmetrology.com

Solartron Metrology Ltd, Registered in England No. 04220056, 2 New Star Road, Leicester, LE4 9JQ

Apéndice H

Planos de utillaje

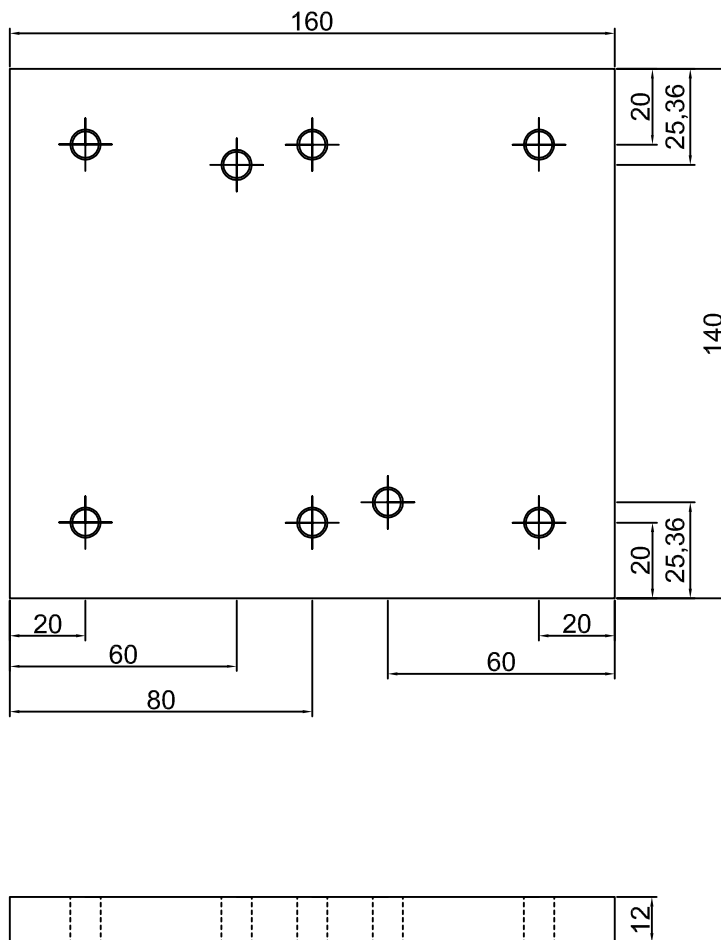
PLACA SUPERIOR



CORRELACIÓN NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO A IMPACTO DE UNA PALA DE PÁDEL

TRABAJO DE FIN DE GRADO - GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

	PLANO DE: PLACA DE ACERO SUPERIOR		PLANO: 1
	REALIZADO POR: ADRIÁN ANTONIO MOLI DÍAZ	FIRMADO:	ESCALA 1/1
	PETICIONARIO: UNIVERSIDAD DE MÁLAGA	TUTORES: GERMÁN CASTILLO LÓPEZ FELIPE GARCÍA SÁNCHEZ	FECHA JUN 2017

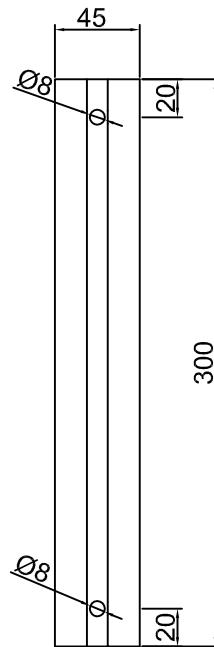


**CORRELACIÓN NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO A IMPACTO
DE UNA PALA DE PÁDEL**

TRABAJO DE FIN DE GRADO - GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

	PLANO DE:		PLANO:
	PLACA INFERIOR		2
	REALIZADO POR:	FIRMADO:	ESCALA:
ADRIÁN ANTONIO MOLI DÍAZ		1/1	
PETICIONARIO:	TUTORES:	FECHA:	
UNIVERSIDAD DE MÁLAGA	GERMÁN CASTILLO LÓPEZ FELIPE GARCÍA SÁNCHEZ	JUN 2017	

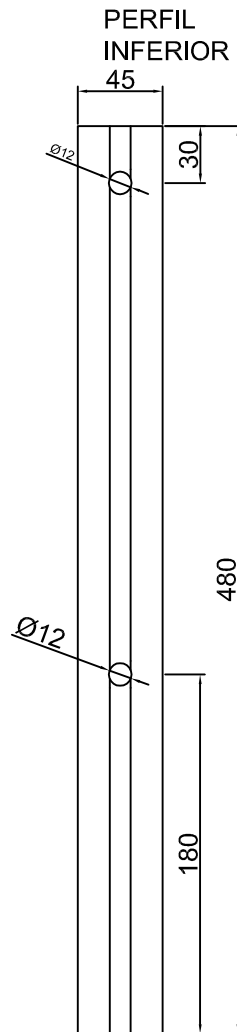
PERFIL
SUPERIOR



**CORRELACIÓN NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO A IMPACTO
DE UNA PALA DE PÁDEL**

TRABAJO DE FIN DE GRADO - GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

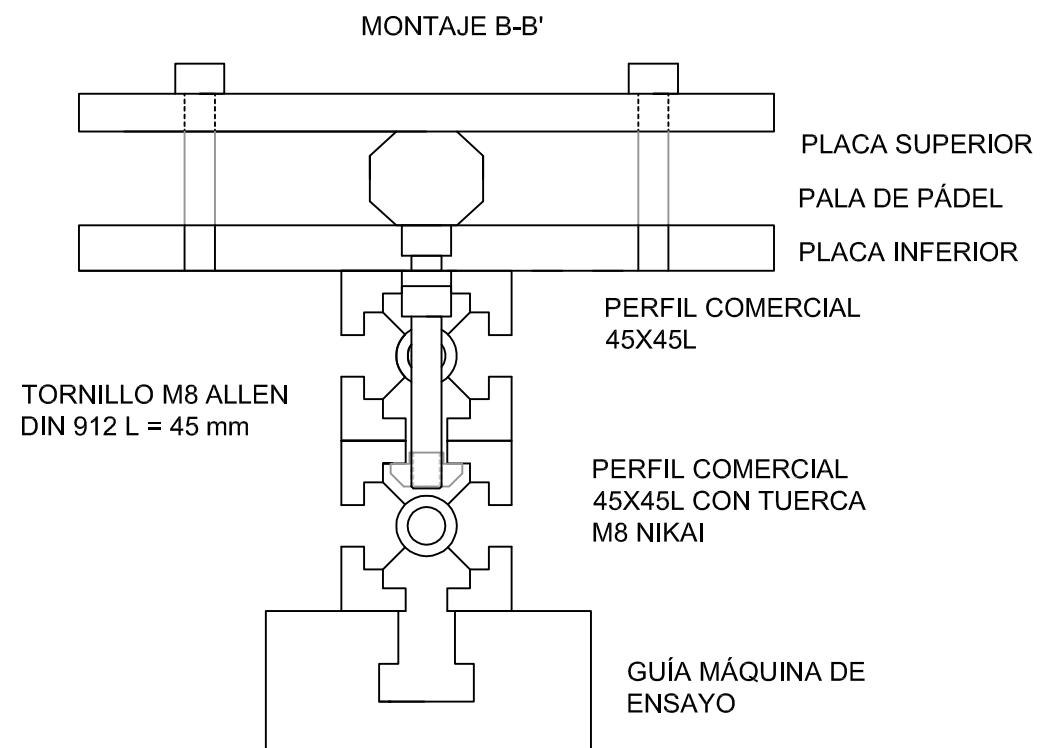
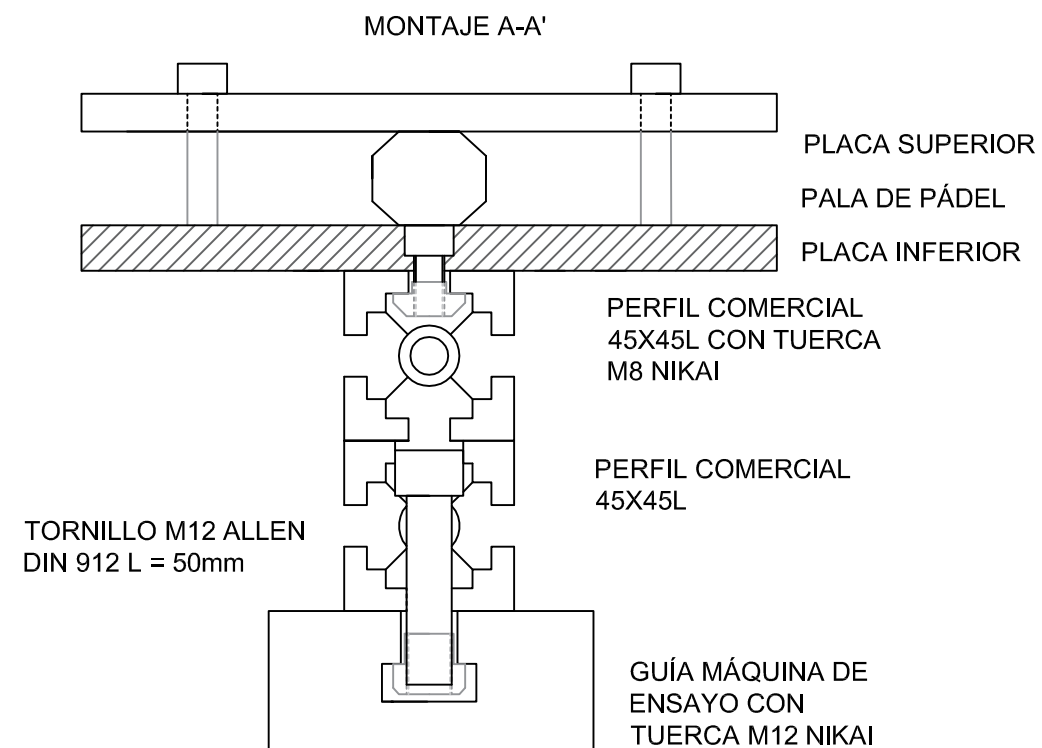
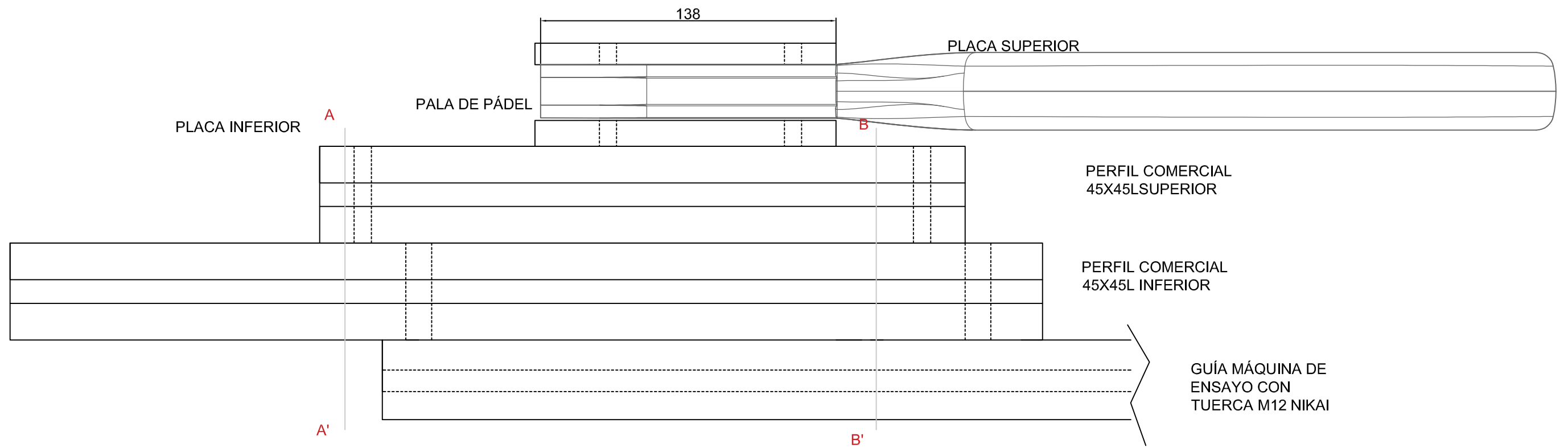
	PLANO DE: TUBO ALUMINIO SUPERIOR		PLANO: 3
	REALIZADO POR: ADRIÁN ANTONIO MOLI DÍAZ	FIRMADO:	ESCALA 1/4
	PETICIONARIO: UNIVERSIDAD DE MÁLAGA	TUTORES: GERMÁN CASTILLO LÓPEZ FELIPE GARCÍA SÁNCHEZ	FECHA JUN 2017



**CORRELACIÓN NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO A IMPACTO
DE UNA PALA DE PÁDEL**

TRABAJO DE FIN DE GRADO - GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

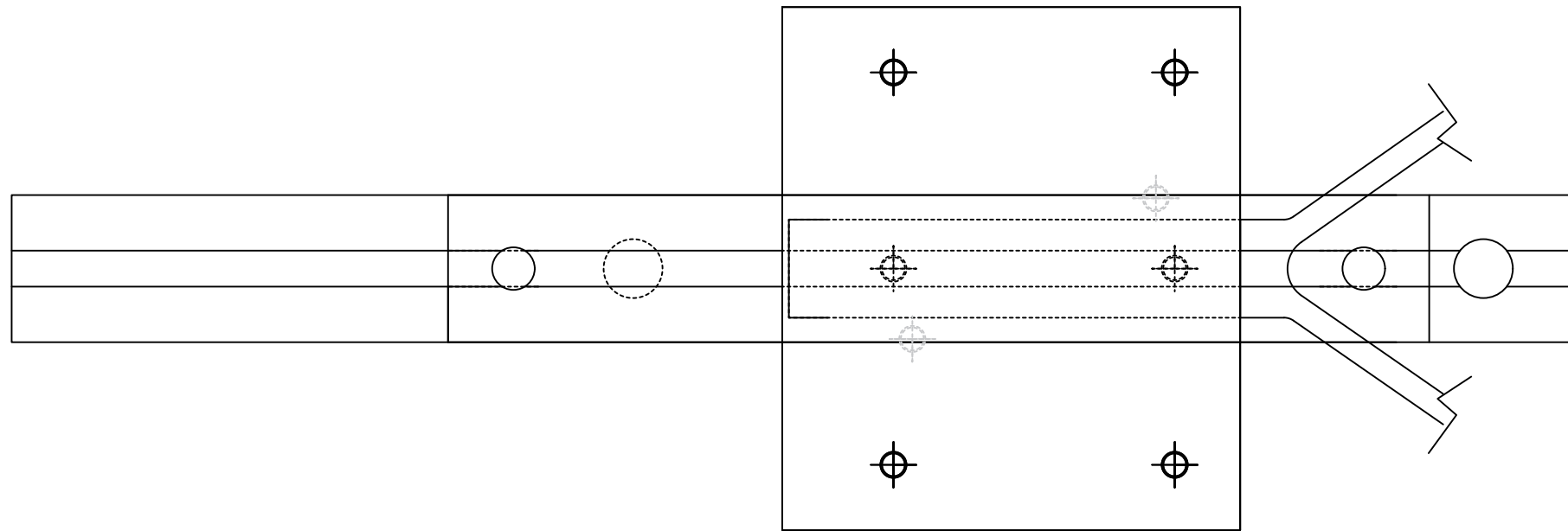
	PLANO DE:		PLANO:
	TUBO ALUMINIO INFERIOR		4
	REALIZADO POR:	FIRMADO:	ESCALA
	ADRIÁN ANTONIO MOLI DÍAZ		1/4
PETICIONARIO:	TUTORES:	FECHA	
UNIVERSIDAD DE MÁLAGA	GERMÁN CASTILLO LÓPEZ FELIPE GARCÍA SÁNCHEZ	JUN 2017	



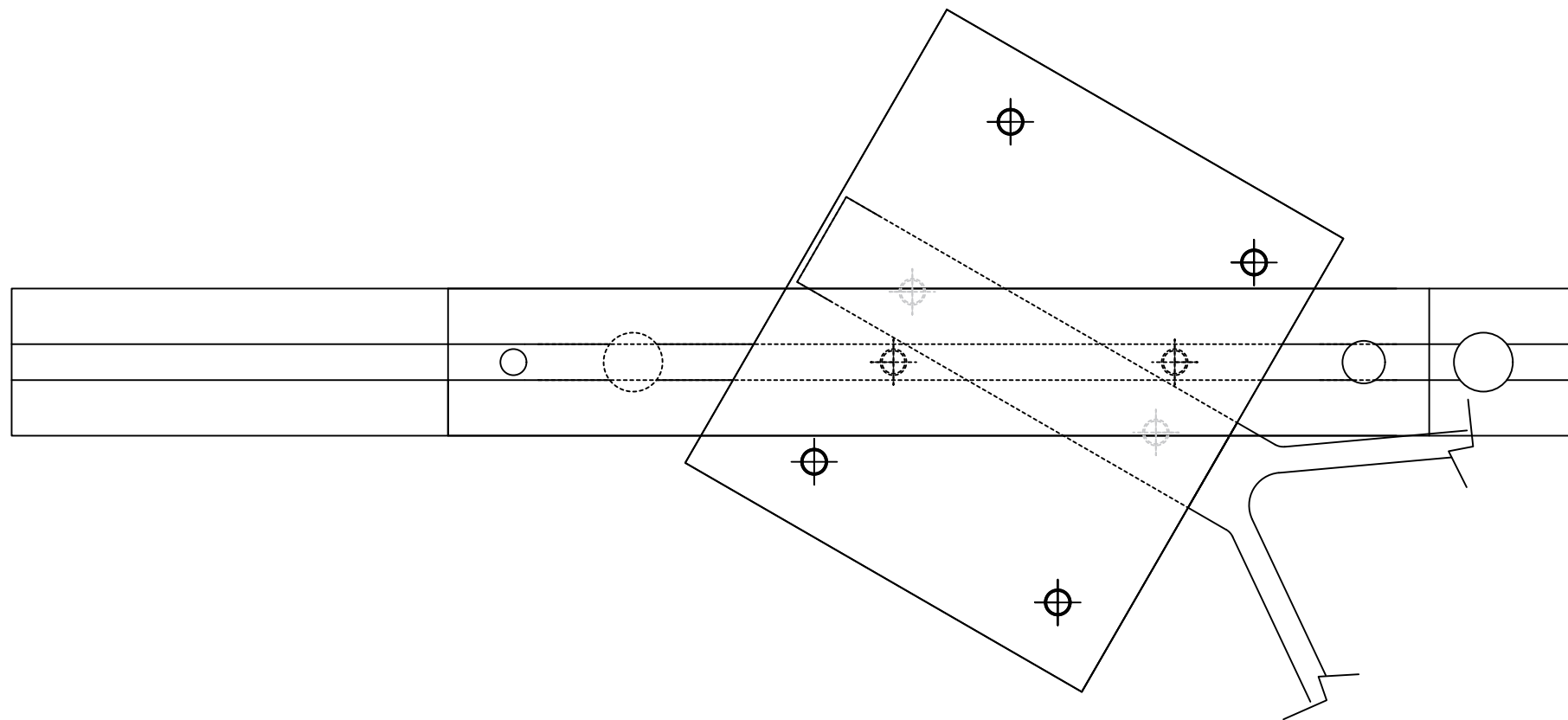
CORRELACIÓN NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO A IMPACTO DE UNA PALA DE PÁDEL

TRABAJO DE FIN DE GRADO - GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

	PLANO DE: UTILLAJE - GUÍAS		PLANO: 5
	REALIZADO POR: ADRIÁN ANTONIO MOLI DÍAZ	FIRMADO:	ESCALA 1/2
	PETICIONARIO: UNIVERSIDAD DE MÁLAGA (UMA)	TUTORES: GERMÁN CASTILLO LÓPEZ FELIPE GARCÍA SÁNCHEZ	FECHA JUN 2017



MONTAJE ENSAYO A FLEXIÓN



MONTAJE ENSAYO A TORSIÓN

CORRELACIÓN NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO A IMPACTO DE UNA PALA DE PÁDEL

TRABAJO DE FIN DE GRADO - GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

	PLANO DE: ESQUEMA MONTAJE		PLANO: 6
	REALIZADO POR: ADRIÁN ANTONIO MOLI DÍAZ	FIRMADO:	ESCALA 1/4
	PETICIONARIO: UNIVERSIDAD DE MÁLAGA (UMA)	PROFESOR: GERMÁN CASTILLO LÓPEZ FELIPE GARCÍA SÁNCHEZ	FECHA JUN 2017