

Análisis de uniones de materiales compuestos en estructuras navales

Trabajo final de Grado



Facultad de Náutica de Barcelona
Universidad Politécnica de Catalunya

Trabajo realizado por:

JUAN VICENTE BOZADA SUAREZ

Dirigido por:

JAVIER MARTINEZ GARCIA

Grau en GTM-GESTN

Barcelona, enero del 2020

Departamento de CEN

“Las decisiones eran solamente el comienzo de algo. Cuando alguien tomaba una decisión, estaba zambulléndose en una poderosa corriente que llevaba a una persona hasta un lugar que jamás hubiera soñado en el momento de decidirse.”

Paulo Coelho, El alquimista.

A. AGRADECIMIENTO

Durante la realización del trabajo de final de carrera, me he dado cuenta de que no he estado solo porque he tenido la gran suerte de contar con el apoyo de muchas personas. Algunas de estas personas han colaborado directamente y otras indirectamente.

Por eso quiero dar mi agradecimiento al profesor que ha hecho posible la realización y la culminación de este trabajo al Dr. Xavier Martinez Garcia profesor de la UPC e investigador del centro de cálculo CIMNE. Le agradezco la dedicación y el conocimiento transmitido no solo durante la realización de este trabajo sino también por el conocimiento que me ha inculcado durante estos cinco últimos años en diversas materias como en la asignatura de mecánica aplica a la ingeniería naval, estructuras aplicadas a la ingeniería naval y otras asignaturas. También quisiera darle las gracias por darme los primeros conocimientos sobre las teorías de los materiales compuestos y esto me ha dejado con más ganas de profundizar en el tema.

Además, quisiera agradecer los conocimientos adquiridos durante la carrera a los docentes de la FNB-UPC algunos tuvieron más éxito que otros a la hora de realizar su labor.

Por último, darle las gracias a mi familia que han estado allí en todo momento para darme el apoyo moral y económico cuando más lo he necesitado. En especialmente a mi madre que me dio su apoyo incondicional desde el primer momento que le dije que quería hacer la doble titulación GTM-GESTN.

B. RESUMEN

En las últimas décadas se está notando más la concienciación para hacer un planeta más sostenible y reducir los efectos del cambio climático. Por estas razones se han hecho diversas propuestas, como los objetivos de desarrollo sostenible de la Naciones Unidas donde proponen diecisiete objetivos (9 Industria innovaciones e infraestructura) y también está el protocolo de Kioto de la CMMUCC (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio Climático) para las reducciones de los gases que provocan el efecto invernadero.

Por ello el presente trabajo, puede contribuir de alguna forma por ejemplo reducir el peso de buque utilizando materiales FRP que son más ligeros que algunos metales y esto contribuye a la reducción de emisiones a la atmosfera. Para ello hago referencia al proyecto FIBERSHIP donde se analizan las ventajas que contribuye en ello, estas ventajas se explicaran más adelante.

El trabajo está constituido por dos partes, la primera parte es donde se explicarán los materiales compuesto, las teorías utilizadas durante el trabajo, las características del material compuesto LEO y por qué se eligió el sistema LEO para el proyecto de FRIBERSHIP.

La segunda parte del trabajo es la familiarización con el programa, para ello se realizarán modelos sencillos de los que se conozcan las soluciones analíticas y así poder compararlos con los resultados obtenidos con el programa GID. Una vez que se tenga conocimiento suficiente continuaremos con nuestro aprendizaje utilizando modelo de daño y de esta forma se podrá analizar analíticamente la unión encolada por solape. El material base a unir corresponde a un laminado de fibra de vidrio con una matriz de viniléster y la unión a analizar es encolada por solape.

Los resultados numéricos se compararán con resultados experimentales. Esta comparación permitirá validar los modelos numéricos realizados. Esto permitirá estudiar el comportamiento de las uniones mediante el análisis numérico y comparar los resultados teóricos obtenidos con las pruebas empíricas.

C. ABSTRACT

In recent decades there has been a growing awareness of the need to make the planet more sustainable and to reduce the effects of climate change. For these reasons, several proposals have been made like Sustainable Development Goals of the United Nations where they propose seven objectives (9 industry, innovation and infrastructure) and there is also the Kyoto protocol of the UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) for reductions in greenhouse gases.

Therefore, this work can contribute in some way, e.g. to reduce the weight of the ship by using FRP materials that are lighter than some metals and this contributes to the reduction of emissions into the atmosphere. For this I refer to the FIBERSHIPS project which explains some advantages that contribute to it, this advantage will be explained later on.

The work consists of two parts, the first part is where the composite materials, the theories used during the work, the characteristics of the LEO composite material and why the LEO system was chosen for the FIBERSHIP project will be explained.

The second part of the work is the familiarization with the program, for this purpose simple models will be made of which the analytical solutions are known and thus be able to compare them with the results obtained with the GID program. Once we have enough knowledge, we will continue with our learning using damage model and in this way, we will be able to analyze analytically the bonding by overlapping. The base material to be joined corresponds to a glass fiber laminate with a vinyl ester matrix and the joint to be analyzed is overlap-glued.

The numerical results will be compared with experimental results. This comparison will allow the validation of the numerical models made. This will allow to study the behavior of the joints by means of numerical analysis and to compare the theoretical results obtained with the empirical tests.

D. ÍNDICE

A. AGRADECIMIENTO	III
B. RESUMEN.....	V
C. ABSTRACT	VII
D. ÍNDICE	IX
E. INDICE DE ILUSTRACIONES	XIII
F. INDICE DE TABLAS.....	XVII
1. LISTA DE SIMBOLOS Y ACRÓNIMOS.	1
2. INTRODUCCIÓN.....	3
3. LOS MATERIALES COMPUESTOS.....	9
3.1. Materiales compuestos considerados en el proyecto Fibership.	12
3.2. Sistema de SAERTEX LEO.....	21
4. MODELO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES	27
4.1. Comportamiento lineal de los materiales.....	27
4.2. Análisis de materiales compuestos.	27
4.2.1. Teoría de mezcla clásica (Paralelo)	28
4.2.2. Participación volumétrica.....	28
4.2.3. Modulo longitudinal.....	29
4.2.4. Teoría de mezcla en serie.....	30
4.2.5. Módulo de cizalladura.....	31
4.2.6. Coeficiente de poisson	32
4.2.7. Teoría de mezcla serie-paralelo	32
4.2.8. Componente en serie y en paralelo.	33
4.3. FORMULACION DEL DAÑO	35
4.3.1. Modelo de daño isotrópico.....	35
4.3.2. Energía de fractura	37
5. COMPORTAMIENTO DE LAS FORMULACIONES UTILIZADAS.....	39
5.1. Definición de las unidades del programa.....	39

5.2.	Propiedades de los materiales	40
5.2.1.	Acero	40
5.2.2.	Fibra de carbono	41
5.2.3.	Epoxi	41
5.2.4.	Fibra de vidrio LEO.	41
5.2.5.	LEO viniléster.....	42
5.3.	Cómo se procederá en el estudio de cada Modelo:	42
5.4.	Modelo 1	45
5.4.1.	Condiciones de Borde:	45
5.4.2.	Tipo de malla y resultado gráfico.	46
5.5.	Modelo 2	47
5.5.1.	Condiciones de borde:.....	48
5.5.2.	Tipo de malla y resultado gráfico.	49
5.6.	Modelo 3	50
5.6.1.	Condiciones de borde.....	50
5.6.2.	Tipo de malla y resultado gráfico.	50
5.7.	Calculo analítico de los modelos 1,2 y 3	52
5.7.1.	Calculo analítico del modelo 1.	52
5.7.2.	Calculo analítico del modelo 2.	52
5.7.3.	Calculo analítico de la viga Modelo 3.	53
5.7.4.	Resumen de los datos recopilados de los tres primeros modelos.....	53
5.8.	Modelo 4	55
5.8.1.	Modelo no lineal	55
5.8.2.	Condiciones de borde.....	56
5.8.3.	Tipo de malla y resultado	58
5.8.4.	Resultados.	58
5.9.	Modelo 5: Modelo de calibración materiales compuesto.	59
5.9.1.	Condiciones de borde caso 1.....	60
5.9.2.	Condiciones de borde caso 2.....	61
5.9.3.	Resultado y comparación del caso 1 y el caso 2.	62
6.	ANÁLISIS DE UNA UNIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS.	67
6.1.	Modelo experimental.....	67
6.2.	Modelo de cálculo.	69
6.3.	Definir el material compuesto.	71

Índice

6.4. Condiciones de borde.....	72
6.5. Resultados.....	73
7. CONCLUSIONES.....	76
8. REFERENCIAS.....	78
ANEXO A.....	80
ANEXO B.....	83
ANEXO C.....	84
ANEXO D.....	87

E. INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Ventajas a usar materiales compuesto.	3
Ilustración 2: Orientación unidireccional de la fibra. (3).....	9
Ilustración 3: Tipos de orientación de la fibra bidireccional y aleatorias. Ever Barbero (2)	10
Ilustración 4: Fibras discontinuas. (3).....	10
Ilustración 5: Fibras en partículas. (3).....	11
Ilustración 6: Laminados unidireccional y bidireccional. (4).....	11
Ilustración 7:(i) Prueba de los 3 puntos. (ii) Prueba de cizallamiento interlaminar. FiberShip (1).....	14
Ilustración 8: Prueba de flexión. (i) Leo 0° (ii) LEO 90° (iii) SR1125 0° (iv) SR1125 90°. FiberShip (1).....	18
Ilustración 9: Prueba de tracción. (i) Leo 0° Fuerza- Desplazamiento (ii) SR1125 0° Fuerza- Desplazamiento (iii) Leo 0° Stress- strain (iv) SR1125 0° Stress-strain.....	19
Ilustración 10:Prueba de tracción. (i) Leo 90° Fuerza- Desplazamiento (ii) SR1125 90° Fuerza- Desplazamiento (iii) Leo 90° Fuerza-Tensión (iv) SR1125 90° Fuerza-Tensión . FiberShip (1).....	19
Ilustración 11: Prueba de sándwich, LEO con la capa final de vidrio-LEO y con núcleo de PVC. FiberShip (1).....	20
Ilustración 12:(ii) Prueba de tracción. (iv). Prueba de sándwich. FiberShip (1).....	20
Ilustración 13:Estructura del material LEO. SAERTEX (5)	22
Ilustración 14: Resultado de la prueba realizada contra incendio. SAERTEX (5).....	22
Ilustración 15: Comparación del material LEO, prueba a compresión. SAERTEX (5) .	23
Ilustración 16: Eficiencia de las propiedades mecánicas. SAERTEX (5).....	23
Ilustración 17: Comparación de toxicidad. SAERTEX (5).....	24
Ilustración 18: Normativas que cumple el material. SAERTEX (5)	24
Ilustración 19:Comparación de materiales. SAERTEX (5)	25

Ilustración 20: Alargamiento del compuesto en paralelo.	30
Ilustración 21: Alargamiento del compuesto en serie.	30
Ilustración 22: Diferencia entre el módulo de cizalladura en el plano de un material compuesto y otro normal. (2)	32
Ilustración 23: Espacio real y espacio real equivalente. (8).	36
Ilustración 24: Esfuerzo vs deformación para energía de fractura (9).	37
Ilustración 25: Izquierda material con mucha energía de fractura y derecha con muy poca energía de fractura.	37
Ilustración 26: Derecha material isótropo e izquierda material anisótropo.	40
Ilustración 27: Divisiones de n, de los modelos a estudiar.	43
Ilustración 28: Referencia de cómo se procederá en cada modelo.	44
Ilustración 29: Modelo 1, medidas y carga aplicada.	45
Ilustración 30: Sección transversal de la viga y carga aplicada.	45
Ilustración 31: Superficie empotrada y direcciones bloqueadas.	46
Ilustración 32: Deformación en Dz para elementos lineales y cuadráticos, n=1.	46
Ilustración 33: Deformación en Dz para elementos lineales y cuadráticos, n=2.	46
Ilustración 34: Deformación en Dz para elementos lineales y cuadráticos, n=4.	47
Ilustración 35: Deformación en Dz para elementos lineales y cuadráticos, n=8.	47
Ilustración 36: Estructura del modelo 2 y carga aplicada.	47
Ilustración 37: Izq. direcciones bloqueadas el apoyo fijo y drcha. direcciones bloqueadas en la rótula.	48
Ilustración 38: Líneas donde están definida la rótula y apoyo fijo.	48
Ilustración 39: Deformación en Dz para elementos lineales y cuadráticos, n=1.	49
Ilustración 40: Deformación en Dz para elementos lineales y cuadráticos, n=2.	49
Ilustración 41: Deformación en Dz para elementos lineales y cuadráticos, n=4.	49
Ilustración 42: Deformación en Dz para elementos lineales y cuadráticos, n=8.	49
Ilustración 43: Modelo 3 y carga aplicada.	50
Ilustración 44: Rotación de 90° eje Z.	50

Índice de ilustraciones.

Ilustración 45: Deformación en Dz para elementos lineales y cuadráticos, n=1	51
Ilustración 46: Deformación en Dz para elementos lineales y cuadráticos, n=2.	51
Ilustración 47: Deformación en Dz para elementos lineales y cuadráticos, n=4	51
Ilustración 48: Deformación en Dz para elementos lineales y cuadráticos, n=8.	51
Ilustración 49: Mallas consideradas (A) n=1; (B) n=2; (C) n =4; (D) n=8.	53
Ilustración 50: Condiciones del modelo 4, no lineal.....	56
Ilustración 51: Donde se aplica el desplazamiento.....	57
Ilustración 52: Derecha valor del desplazamiento aplicado e izquierda pasos de cálculos.	57
Ilustración 53: Superficie empotrada y direcciones fijadas.	57
Ilustración 54: DEGMA del modelo 4.	58
Ilustración 55: Fuerza vs desplazamiento modelo 4.....	59
Ilustración 56: Cotas del micro modelo en mm.....	59
Ilustración 57: Composite del modelo 5.	60
Ilustración 58: Condiciones de borde modelo 5 caso 1. Izquierda superficie fijas y derecha superficie donde se aplica el desplazamiento.	61
Ilustración 59: Condiciones de borde caso 2.....	61
Ilustración 60: Desplazamiento en x.	63
Ilustración 61: Desplazamiento en Y.....	63
Ilustración 62: Desplazamiento en Z.....	64
Ilustración 63: Deformación general.....	64
Ilustración 64: Deformación ocasionada por la tracción.	65
Ilustración 65: Grafica de fuerza vs desplazamiento modelo 5 caso2.	65
Ilustración 66: Condición de iso-deformación. Fibra, compuesto y fibra, respetivamente.	66
Ilustración 67: Prueba experimental.....	67
Ilustración 68: Empaquetadura añadida.....	68
Ilustración 69: Resultados obtenidos de la prueba experimental.....	68

Ilustración 70: Puntos de donde se tomarán los desplazamientos.	69
Ilustración 71: Modelo 7 en 3D	69
Ilustración 72: Vista de los perfiles y cotas del modelo 7.	70
Ilustración 73: Trozo añadido en los extremos del modelo.....	70
Ilustración 74: Características del compuesto No-Lineal.....	71
Ilustración 75: Condición de borde 1, superficie fija en todas las direcciones.	72
Ilustración 76: Superficie donde se aplicará el desplazamiento.	72
Ilustración 77; comparación de los resultados experimentales y el modelo numérico en grandes deformaciones (LD) y pequeñas deformaciones (SD).	73
Ilustración 78: Izquierda calculo con grandes deformaciones y derecha calculo con pequeñas deformaciones.....	74
Ilustración 79: Tensiones del solape de viniléster.	74
Ilustración 80: Elemento lineal.	83
Ilustración 81: Elemento cuadrático.	83
Ilustración 82: Características del modelo no lineal.	84
Ilustración 83: Para asumir que el material tenga un comportamiento no lineal.	85
Ilustración 84: Datos que modificar para obtener la gráfica vs desplazamiento.....	85
Ilustración 85: Comandos para ejecutar PLCd16.	86

F. INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Estimación de ahorro de peso en la construcción naval. (1).....	4
Tabla 2: Tipo de resina que pasaron a la segunda fase. FiberShip (1)	13
Tabla 3: Tabla resumen de las pruebas realizadas en etapa 1. FiberShip (1).....	15
Tabla 4: Comparación de las pruebas realizadas en seco y mojado. FiberShip (1)	16
Tabla 5: Dimensiones de las probetas para la etapa 2 (NR546 BV). FiberShip (1).	17
Tabla 6: Resumen de las pruebas en sándwich. FiberShip (1)	20
Tabla 7:Resultado de la prueba de tracción, LEO y SR1125. FiberShip (1).....	21
Tabla 8: Algunas unidades que se utilizaran en el proyecto.....	39
Tabla 9: Características del acero.....	40
Tabla 10:Características de la fibra de carbono.	41
Tabla 11: Características del epoxi.	41
Tabla 12: Características de la fibra de vidrio LEO.	41
Tabla 13: Características del LEO viniléster	42
Tabla 14: Características del compuesto LEO.	42
Tabla 15: Resumen del número de elemento de cada modelo.	53
Tabla 16: Deformaciones y error relativo.	54
Tabla 17: Modelo 4.	55
Tabla 18:Modelo de daño modelo 5.....	62
Tabla 19: Características de los modelos grandes deformaciones y pequeñas deformaciones	71
Tabla 20: Cargas máxima en grandes deformaciones y experimentales.....	75
Tabla 21: características de las resinas (1).....	81
Tabla 22:Detalle de fabricación de los laminado Etapa 1. (1).....	82

1. LISTA DE SIMBOLOS Y ACRÓNIMOS.

ε	Deformaciones.
\mathbf{G}	Fuerza de cizalladura.
τ_{ij}	Tensiones tangenciales.
ν	Coefficiente de poisson.
σ	Tensiones o tensión real (en el modelo de daño).
E	Módulo de Young.
K_m	Participación volumétrica de la matriz.
K_f	Participación volumétrica de la fibra.
G_f	Energía de fractura.
V_f	Volumen de la fibra.
V_m	Volumen de la matriz.
\mathbb{P}_P	Tensores complementarios en paralelo.
\mathbb{P}_S	Tensor complementario en serie.
$\bar{\sigma}$	Matriz del tensor de esfuerzo.
$\bar{\sigma}_P$	Matriz del tensor en paralelo.
$\bar{\sigma}_S$	Matriz del tensor en serie.
\mathbf{M}	Variable para el modelo de daño.
σ_0	Tensiones efectivas.
d	Cantidad de daño entre 0 a 1.
W_f	Trabajo de fractura.
A_f	Área de fractura.
γ_{xy}	Deformación por cortante

ASTM *American Society for Testing and Materials.*

CIMNE *(Centro Internacional de Métodos Numéricos Ingeniería)*

DIN *Deutsches Institut für Normung. Instituto Alemán de Normalización*

FTP *Fire Test Procedure.*

FRP *Fibre reinforced Polymer.*

HSC *High Speed Craft.*

GHG *Greenhouse Gas.*

HLU *Hand Lay- up*

IMO *international Maritime Organization.*

ISO *International Organization for Standardization.*

LEO *Lightweight with Extreme Opportunities.*

MSC *Maritime Safety Commette.*

PLCd *Plastic Crack Dynamic.*

PRFV *Plástico Reforzado con Vidrio.*

TEU *Twenty-foot Equivalent Unit.*

2. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas se ha acentuado la preocupación para hacer un planeta más sostenible, aplicando diversos objetivos como los diecisiete objetivos para el 2030, conocido como la agenda 20/30 y también está el protocolo de Kioto de la CMMUCC (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio Climático) para las reducciones de los gases que provocan el efecto invernadero.

También cabe recalcar que Europa tiene una alta participación en la industria mundial en la construcción naval y el transporte marítimo, y tiene un control del alrededor del 40% de la flota mundial. Por esto la industria naval europea sigue ocupando una posición de liderazgo por ofrecer con determinación productos con un valor añadido e incluido un gran desarrollo de las construcciones ligera. Por ello se plantean utilizar materiales compuesto o llamado FRP (*Fibre Reinforced Polymers*) en buque de gran eslora mayor de 50 metros. Hay un proyecto que muestra las ventajas de hacer los buques de FRP, este proyecto es el *FiberShip* y algunas ventajas son las siguientes; la reducción de peso, el ahorro del consumo de combustible, un aumento considerable del ciclo de vida, reducir el coste de mantenimiento, aumenta la estabilidad, es inmune a la corrosión, reduce el ruido submarino y se puede reciclar hasta el 75%.

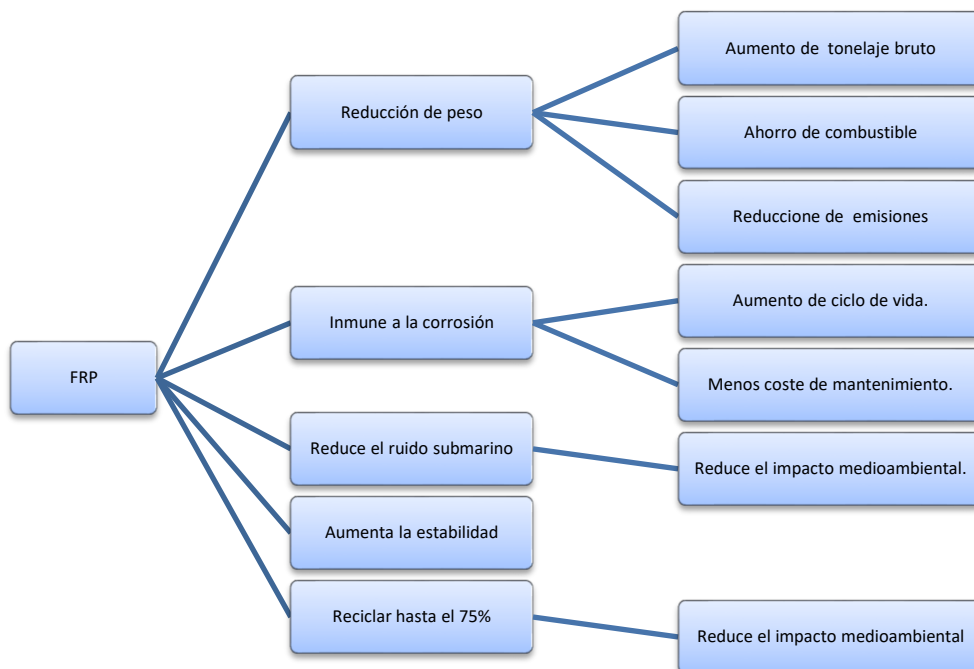


Ilustración 1: Ventajas a usar materiales compuesto.

La reducción de peso, el estudio que se ha realizado en el proyecto *FiberShip* ha obtenido que reducción del peso de la estructura se estima que será superior al 70%, en comparación a un buque de fabricado en acero que existen actualmente, esto se puede contrastar en la tabla 1. Esto también conlleva al ahorro de combustible que será del alrededor de un 15 % en su vida útil y por lo tanto la reducción de emisiones *GHG*. La reducción de peso reduce directamente el coste por tonelada y por lo tanto aumenta la capacidad de carga y, por lo tanto, se estima que la reducción de peso de un pequeño portacontenedores de unos 100 TEU aumentaría su tonelaje bruto un 12% y para un portacontenedores de aproximadamente de 700 TEU el aumento de tonelaje se estima de un 7%.

Shell Plating	Framing	Forging & Casting	Decks	Bulkhead & Trucks	Pillar & Girders	Foundat.	Superstr.	Miscell.
0.57-0.50	0.50-0.57	0.50	0.57-0.50	0.60	1.00	1.00	0.50	0.75

Tabla 1: Estimación de ahorro de peso en la construcción naval. (1)

También se estima que las operaciones de costes de un barco FRP es menor a que las construcciones en acero, se estima una reducción de un 7% para los portacontenedores medianos y del 3 % en un gran granelero. Además, diferentes estudios sugieren que la industria del PRFV es capaz de lograr una tasa de reciclaje de hasta el 75% (en comparación con el 34% de la industria siderúrgica).

La eficiencia de coste y la gestión del ciclo de vida, este es un punto clave porque el mercado marítimo es extremadamente competitivo y requieren soluciones rentables a largo plazo y por eso el ciclo de vida tiene que ser considerable. También hay que decir que los busque deberán mantener en condiciones óptimas durante su vida útil, por lo tanto, es necesario desarrollar nuevos procedimientos de inspecciones, reparación y mantenimiento para mantenerlo en buenas condiciones. Y por último para el reciclado del buque se recomendará soluciones optimas teniendo en cuenta el coste de vida, el riesgo y el impacto medioambiental.

Por las ventajas comentada anteriormente al emplear materiales PRP en la industria naval, el presente trabajo se realiza con el objetivo de comprender el comportamiento de uniones de materiales compuesto en estructura. Para ello se utiliza método numérico en este caso la teoría de mezcla serie-paralelo.

Tipos de uniones.

A pesar de todas las ventajas que tiene los materiales compuesto presenta dos problemas, el primero es conseguir una buena caracterización del comportamiento de los materiales compuestos y por ello es necesario tener buenos programas de cálculo. El segundo problema, son las uniones que se realizan suelen ser más débiles que el material base que se usa, a diferencia de las uniones de acero que son más fuertes.

En este proyecto se trata ambos temas, la simulación numérica de una unión mediante la utilización de la formulación de la teoría serie-paralelo para el análisis de compuesto.

Hay tres formas esenciales para unir materiales, componentes y estructuras. Estas tres uniones son mecánicas, adhesivas y soldaduras.

Las uniones mecánicas, este tipo de unión puede depender o no de un tercer componente, este tercer componente puede ser remache o combinación de tornillos y tuercas. En caso de que la unión no dependa de un tercer elemento se realiza la unión o el enclavamiento entre los materiales que se van a unir mediante características diseñada o fabricadas en las partes a unir como la cola de milano, las conexiones a presión u otras. Pero en general estos tipos de uniones no se usan en materiales compuesto, al menos que sea una técnica mixta como la de Comeld que sirve para unir un metal con un material compuesto mediante una capa adhesiva entre los dos materiales a unir.

Las uniones adhesivas, este tipo de unión es necesario un tercer componente para realizarla. Debido a su fácil aplicación, a su capacidad para unir materiales diferentes, a la capacidad de realizar uniones en grandes áreas (bajo esfuerzo) y además actúa como sellador. Por estos motivos se están implementándolo en diversas industrias como la aeroespacial y automoción. Los materiales unidos pueden ser delgados, ya que las cargas se reparten en un área más grandes y la técnica se puede lograr sin aplicar calor, además no hay problemas con la corrosión galvánica y permite dotar a las uniones de una elevada resistencia a las cargas de fatiga

A pesar de todos estos beneficios de presentan algunos inconvenientes que son:

- Susceptibilidad a la degradación de las uniones en ciertos ambientes, incluyendo temperaturas extremas (incluyendo fuego), humedad, radiación ultravioleta (UV) y ciertos solventes.
- Dificultad para desmontar las juntas, lo que dificulta el mantenimiento, la reparación o el reciclaje.

- Puede ser necesario realizar y comprobar la preparación de la superficie antes de que se produzca la unión.
- Falta de técnicas de inspección no destructivas que puedan identificar uniones deficientes.

Aunque se han hecho considerables avances en la unión adhesiva, los ingenieros y diseñadores todavía se enfrentan a importantes retos, que es la falta de experiencia a largo plazo en uniones adhesivo en un entorno marítimo que esta sometidas a cargas.

Las uniones por soldaduras, consiste en unir las piezas calentando las superficies hasta el punto de fusión. Tradicionalmente limitada a las uniones de metales, polímeros y más recientemente a compuesto con matriz polimérica utilizando el proceso Raptation. A diferencia de la unión adhesiva que requieren una reacción química, la soldadura se basa en que los átomos se atraen entre si y se unen, formando uniones que muestran una excelente integridad estructural y eficiencia. Los problemas con las soldaduras de materiales poliméricos (conocida como unión por fusión) son las siguientes:

- Las temperaturas elevadas pueden afectar a los materiales circundantes.
- La cristalinidad (la estructura cristalina) puede verse afectada y necesita ser controlada.
- La inspección (ensayos no destructivos (END)) es compleja.
- Dificultad para desmontar articulaciones.

Por lo tanto, en este trabajo se tratarán los siguientes apartados con el objetivo de analizar una unión de materiales compuestos y utilizando una resina como adhesivo, estos apartados son los siguientes:

- Los materiales compuestos, en este apartado se explicarán los materiales compuesto siguiendo la clasificación de (2), como se seleccionó el material para el proyecto *FiberShip* y características del material que se seleccionó para el proyecto *FiberShip*.
- Modelo para la caracterización de los materiales, en este apartado se explicarán las teorías aplicada en este trabajo.
- Comportamiento de las formulaciones utilizadas, en este apartado se describen los modelos de cálculos realizados de estructuras de geometrías simples, con los que se evaluarán las distintas formulaciones que se utilizarán en la simulación de la unión de materiales compuestos.

Introducción

- Análisis de una unión de materiales compuestos, en este apartado se explicarán las características de la unión que se va a analizar y el procedimiento que se seguirá para poder realizar la comparación con el resultado experimental.

3. LOS MATERIALES COMPUESTOS.

En este apartado se dará una pequeña introducción de que son los materiales compuestos. Un material compuesto se define como la combinación de dos o más materiales para lograr combinar las propiedades de los materiales utilizados. Los principales componentes de los materiales compuestos se denominan fibras y la matriz o material base y resina.

Las características principales de los materiales compuestos son las siguientes; la reducción de peso, resistencia a la corrosión, la reducción de números de piezas, la transparencia electromagnética, la resistencia al desgaste, mayor duración a la fatiga, mejor aislamiento térmico/acústico, baja expansión térmica y la baja o alta conductividad térmica.

Los compuestos se pueden clasificar de muchas formas, pero el criterio que se seguirá es el siguiente extraído del libro de Barbero (2):

- **Refuerzo:**
 - Fibra larga continua, su principal función es soportar y transmitir la carga que se aplicará en la misma dirección de la fibra.
También este tipo de fibra tiene una relación entre longitud y el diámetro muy alto, por lo tanto, cualquier aumento de la longitud de la fibra no implicaría un aumento del módulo de Young de la fibra. Además, este tipo de fibras pueden ser usadas como refuerzo estructural.
 - Orientación unidireccional de fibra, la orientación de la fibra solo es en una dirección.

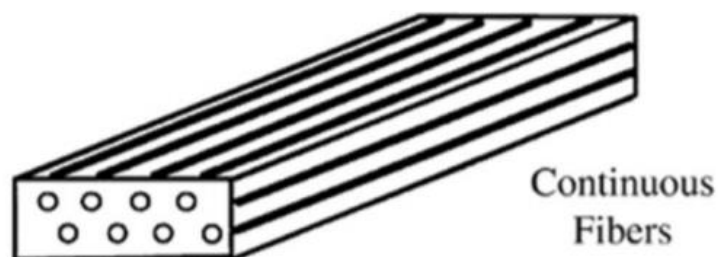


Ilustración 2: Orientación unidireccional de la fibra. (3)

- Orientación bidireccional de la fibra, la orientación de la fibra tiene diversa orientación.
- Orientación aleatoria

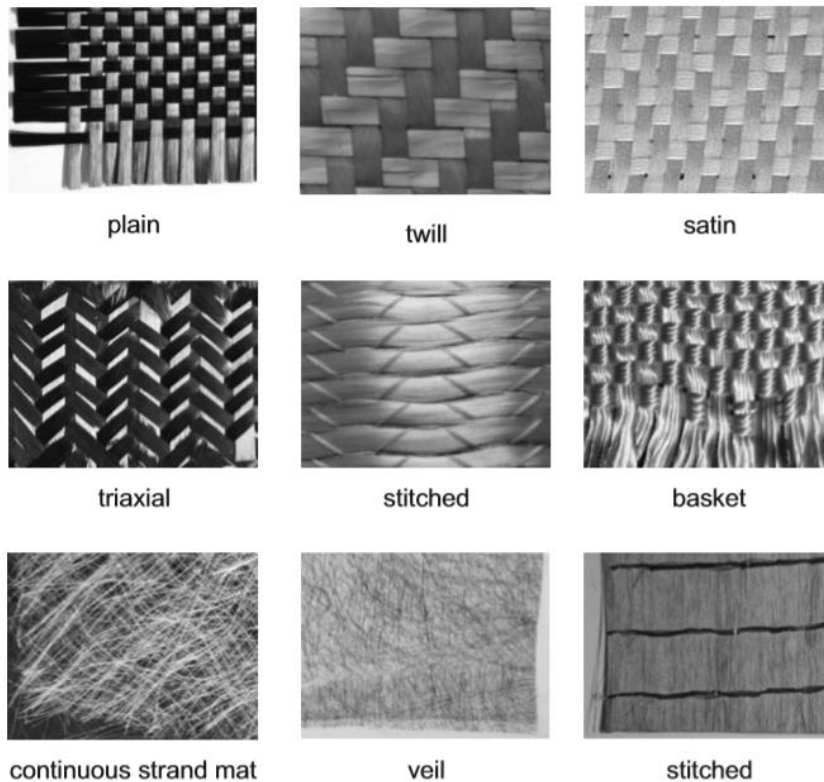


Ilustración 3: Tipos de orientación de la fibra bidireccional y alectorias. Ever Barbero (2)

- Fibras discontinuas, este tipo de fibra no son capaces de transmitir carga por la falta de continuidad de la fibra. Este tipo de fibra tiene una relación entre longitud y el diámetro de la fibra entre 0,2 y 1. Esto implicará que cualquier cambio en sus dimensiones alterará sus propiedades estructurales. Además, no se usa para refuerzo estructurares, sino que se usa como relleno.



Ilustración 4: Fibras discontinuas. (3)

- Orientación aleatoria
- Orientación preferencial

Los materiales compuestos.

- Partículas e hilos, las características son las mismas que la fibra discontinua.

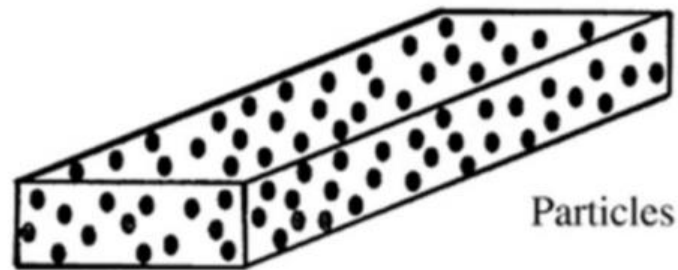


Ilustración 5: Fibras en partículas. (3)

- Orientación aleatoria
- Orientación preferencial
- **Configuración del laminado**, la formación de esta configuración es a partir de las fibras continuas largas con diferentes ángulos y varias capas.
 - Unidireccional, incluyendo capas con el mismo material y orientación de todas las capas
 - Laminado, donde al menos algunas capas tienen diferente orientación o material.

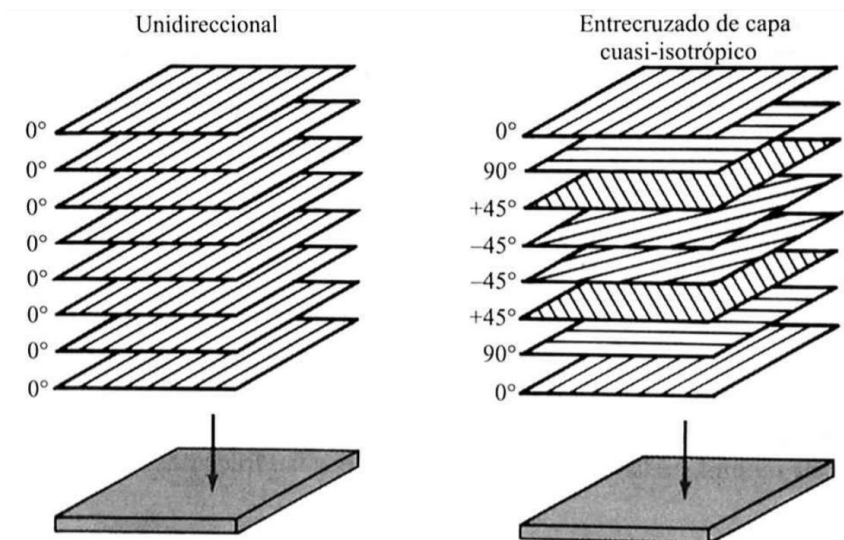


Ilustración 6: Laminados unidireccional y bidireccional. (4)

- **Estructura híbrida**
 - Diferentes materiales en varias capas
 - Refuerzos diferentes en una capa.

3.1. Materiales compuestos considerados en el proyecto Fibership.

En este apartado se explicará cómo se seleccionó el material que se utilizará en el proyecto de FIBERSHIP (datos proporcionados por un colaborador del proyecto) a partir de las características de algunos materiales compuestos, teniendo en cuenta el material base y la resina que se utilizará.

La primera preselección se tuvo en cuenta las siguientes consideraciones para fabricar el material que son las siguientes:

- TRL 7 nivel del material. En este caso el material o prototipo fue probado en un medio real.
- Compatibilidad de los materiales con las técnicas de fabricación actuales y futuras de los astilleros.
- Densidad
- Resistencia al fuego.
- Rendimiento mecánico.
- Durabilidad
- Resistencia al ambiente local por ejemplo la humedad.
- Reciclabilidad
- Disponibilidad y coste

A continuación, se realizará una selección más exhaustiva, para ello se siguió una estrategia de dos etapas que son las siguientes:

Etapas 1: Selección de laminados compuestos fabricado con refuerzo de fibra de vidrio como base y la realización de prueba.

Las características principales de las resinas que se seleccionaron son las siguientes:

- *Viniléster*, es muy común y rentable, pero las propiedades mecánicas son relativamente bajas y las emisiones de estireno es su principal problema.
- *Uretano acrílico*, generalmente tiene unas propiedades mecánicas mejores comparando con el *polyester* y las emisiones de estireno son un problema.
- *Epoxi*, generalmente las propiedades mecánicas son mejores que las del *polyester*, *viniléster* y *uretano acrilato*. La ventaja es que no emite estireno.
- *Bio Epoxi*, el coste y la disponibilidad son aceptable pero el principal reto es su base biológica. Su sostenibilidad es lo que hace favorable.

Los materiales compuestos.

- *Phenolic*, excelente con FRT (Fire Smoke Toxicity) pero pueden presentar problemas con ciertos procesos de infusión.
- *Infusible acrylic thermoplastic*, rendimiento comparable al epoxi en los procesos térmicos y propiedades mecánicas.
- *Polyester*, es la resina más común y la más económica que se utiliza. Pero sus propiedades mecánicas son bajas y las emisiones de estireno es su principal problema.
- *Bio-Polyester*, tiene un coste y disponibilidad aceptable pero el mayor desafío es su base biológica. Otro de sus aspectos más positivos es la sostenibilidad.

Para ver el tipo de infusión que se utilizó, los materiales candidatos iniciales y preseleccionado véase el Anexo A.

RESIN CLASS	RESIN & GLASS FABRIC DETAILS	SUPPLIER	CLAIMED FIRE RETARDANCY	Ulim Resin Cost (€ PER KILO)	Ulim Resin/Hardener Mixture Cost (€ PER KILO)
VINYLESTER	LEO SYSTEM LEO Glass	Saertex	Yes (coating)	€11.14	€14.00
URETHANE ACRYLATE	CRESTAPOL 1210 996gsm Glass	Scott Bader	No	€8.50	€8.46
EPOXY	PRIME 27 996gsm Glass	Gurit SV	No	€9.10	€10.34
	SR1125 996gsm Glass	Sicomín	Yes (coating)	€17.60	€18.47
BIO-EPOXY	SUPER SAP CLR 996gsm Glass	Entropy Resins	No	€10	€13.10
PHENOLIC	CELLOBOND J2027X 996gsm Glass	Hexion	Yes (inherent)	€4.13	€4.48
ACRYLIC THERMOPLASTIC	ELIUM 150 996gsm Glass	Arkema	No	€27.25	€26.83

Tabla 2: Tipo de resina que pasaron a la segunda fase. FiberShip (1)

Las pruebas que se realizaron en esta etapa son los siguientes:

- Prueba de flexión, la prueba de tres puntos se realizó en condiciones casi estática. Las muestras se secaron durante cuatro horas a 45 °C antes de la prueba. Se utilizó una longitud nominal de 60 mm y la velocidad de la prueba fue de 1 mm por minuto. El diámetro del rodillo superior es de 10 mm y el del rodillo inferior es de 4 mm. Se dispusieron sus fibras en el sentido longitudinal de la probeta.

Además, de probar las propiedades en seco, se probaron en mojado y para ello las probetas se sumergieron en agua destilada a 35°C durante un periodo de 28 días de acuerdo con la Lloyds Register Book K, Procedure 14-1, Rev 1 Dec 2013

- Fuerza de cizallamiento interlaminar, se llevó a cabo la prueba de curvatura de tres puntos en un tramo corto en condiciones de carga casi estática. Se utilizó una longitud nominal de 15 mm y la velocidad de la prueba fue la misma que la de la prueba de flexión 1mm por minuto. Los diámetros de los rodillos son los mismos que en la prueba anterior.

Además, esta prueba también se realizó en húmedo en la misma condición que la prueba anterior.

- Contenido de fibra, el contenido de fibra se determinó utilizando el método de quemado de la resina. Este método consiste en secar en un horno a 550°C durante unas dos horas, esto quema la matriz y solo deja las fibras secas.
- Densidad, la densidad se determinó utilizando el método de desplazamiento de agua. Esta prueba consiste en colocar la probeta en un soporte y se sumerge en agua desionizada a 23±2°C. Conociendo la masa de la probeta y la masa aparente del soporte se puede calcular la densidad.



Ilustración 7:(i) Prueba de los 3 puntos. (ii) Prueba de cizallamiento interlaminar. FiberShip (1)

Los materiales que pasaron a la etapa 2 fueron dos, aunque todos los laminados mostraron buenas propiedades en general con pequeñas variaciones y los criterios que se basaron en que el material debería tener una importancia resistencia al fuego y una fabricación en condiciones ambientales.

- LEO viniléster (con resina retardante de fuego y una capa final).
- SR1125 epoxi (con resina retardante de fuego, con tecnología en gel de retardante de fuego y una capa final)

Table 5. Stage I mechanical and physical testing results

RESIN CLASS	RESIN/ REINFORCEMENT	V _f (FIBRE VOLUME FRACTION)*	DENSITY*	APPARENT INTERLAMINAR SHEAR STRENGTH**†	FLEXURAL STRENGTH**†	FLEXURAL MODULUS**†	Resin Cost (€ per kg)	Resin/Hardener Mixture Cost (€ per kg)
VINYLESTER	LEO SYSTEM LEO UD 940 gsm Glass	56% (4.3%)	2.233 g/cm ³ (1.8%)	44.41 MPa (8.8%)	592.0 MPa (22%)	22.03 GPa (21%)	€11.14	€14.00
URETHANE ACRYLATE	CRESTAPOL 1210 UD 996 gsm Glass	57% (0.3%)	2.017 g/cm ³ (0.7%)	42.09 MPa (3.0%)	790.61 MPa (11.3%)	34.52 GPa (2.0%)	€8.50	€8.46
EPOXY	PRIME 27 UD 996 gsm Glass	58% (0.9%)	2.061 g/cm ³ (0.5%)	58.04 MPa (2.4%)	917.1 MPa (2.4%)	35.37 GPa (2.8%)	€9.10	€10.34
	SR1125 UD 996 gsm Glass	58% (3.0%)	2.198 g/cm ³ (2.3%)	50.53 MPa (1.7%)	853.8 MPa (8.5%)	30.35 GPa (8.1%)	€17.60	€18.47
BIO-EPOXY	SUPER SAP CLR UD 996 gsm Glass	60% (0.6%)	2.158 g/cm ³ (0.9%)	57.78 MPa (3.6%)	865.2 MPa (8.9%)	32.80 GPa (3.8%)	€10	€13.10
PHENOLIC	CELLOBOND J2027X UD 996 gsm Glass	58% (0.4%)	1.984 g/cm ³ (0.9%)	33.51 MPa (4.8%)	858.8 MPa (6.7%)	34.92 GPa (4.1%)	€4.13	€4.48
ACRYLIC THERMOPLASTIC	ELIUM UD 996 gsm Glass	56% (1.0%)	1.999 g/cm ³ (0.4%)	56.87 MPa (3.6%)	942.8 MPa (3.8%)	33.86 GPa (1.6%)	€27.25	€26.83

*: Coefficient of variation is shown in parenthesis; † Minimum required property values for FRP laminates, Lloyds Register Book K, Procedure 14-1, Rev 1 Dec 2013; Interlaminar Shear Strength at least 15 MPa; Flexural Strength for laminate with equivalent fibre mass fraction (0.72) at least 367 MPa; Flexural Modulus for laminate with equivalent fibre mass fraction (0.72) at least 19.5 GPa

Tabla 3: Tabla resumen de las pruebas realizadas en etapa 1. FiberShip (1)

RESIN CLASS	RESIN/ REINFORCEMENT	APPARENT INTERLAMINAR SHEAR STRENGTH			FLEXURAL STRENGTH			FLEXURAL MODULUS		
		DRY	WET*	CHANGE	DRY	WET*	CHANGE	DRY	WET*	CHANGE
URETHANE ACRYLATE	LEO INFUSION RESIN/LEO UD 940gsm Glass	38.11 MPa (4.9%)	37.48 MPa (3.4%)	-1.7%	820.71 MPa (6.8%)	829.22 MPa (9.8%)	+1.0%	28.59 GPa (4.0%)	31.69 GPa (2.1%)	+10.8%
		42.09 MPa (3.0%)	41.90 MPa (2.4%)	-0.5%	790.6 MPa (11.3%)	785.9 MPa (1.5%)	-0.6%	34.52 GPa (2.0%)	35.34 GPa (2.3%)	+2.4%
EPOXY	PRIME 27/ UD 996gsm Glass	58.04 MPa (2.4%)	48.45 Mpa** (2.9%)	-16.5%	917.1 MPa (2.4%)	746.7 MPa (5.0%)	-18.6%	35.37 GPa (2.8%)	33.80 GPa (6.1%)	-4.4%
		50.53 MPa (1.7%)	51.86 MPa (1.7%)	+2.6%	853.8 MPa (8.5%)	812.2 MPa (1.9%)	-4.9%	30.35 GPa (8.1%)	31.02 GPa (2.7%)	+2.2%
BIO-EPOXY	SUPER SAP CLR/ UD 996gsm Glass	57.78 MPa (3.6%)	56.61 MPa (0.9%)	-2.0%	865.2 MPa (8.9%)	837.3 MPa (4.3%)	-3.2%	32.80 GPa (3.8%)	31.52 GPa (4.1%)	-3.9%
PHENOLIC	CELLOBOND J2027X/ UD 996gsm Glass	33.51 MPa (4.8%)	35.73 MPa (8.5%)	+6.6%	858.8 MPa (6.7%)	859.0 MPa (3.1%)	+0.02%	34.92 GPa (4.1%)	34.60 GPa (1.6%)	-0.9%
ACRYLIC (TP)	ELIUM/ UD 996gsm Glass	56.87 MPa (3.6%)	35.56 MPa (14.5%)	-37.5%	942.8 MPa (3.8%)	779.8 MPa (11.6%)	-17.3%	33.86 GPa (1.6%)	33.99 GPa (1.0%)	-0.4%

Tabla 4: Comparación de las pruebas realizadas en seco y mojado. FiberShip (1)

Etapla 2. Caracterización detallada de los dos sistemas de resina con varios refuerzos y núcleos.

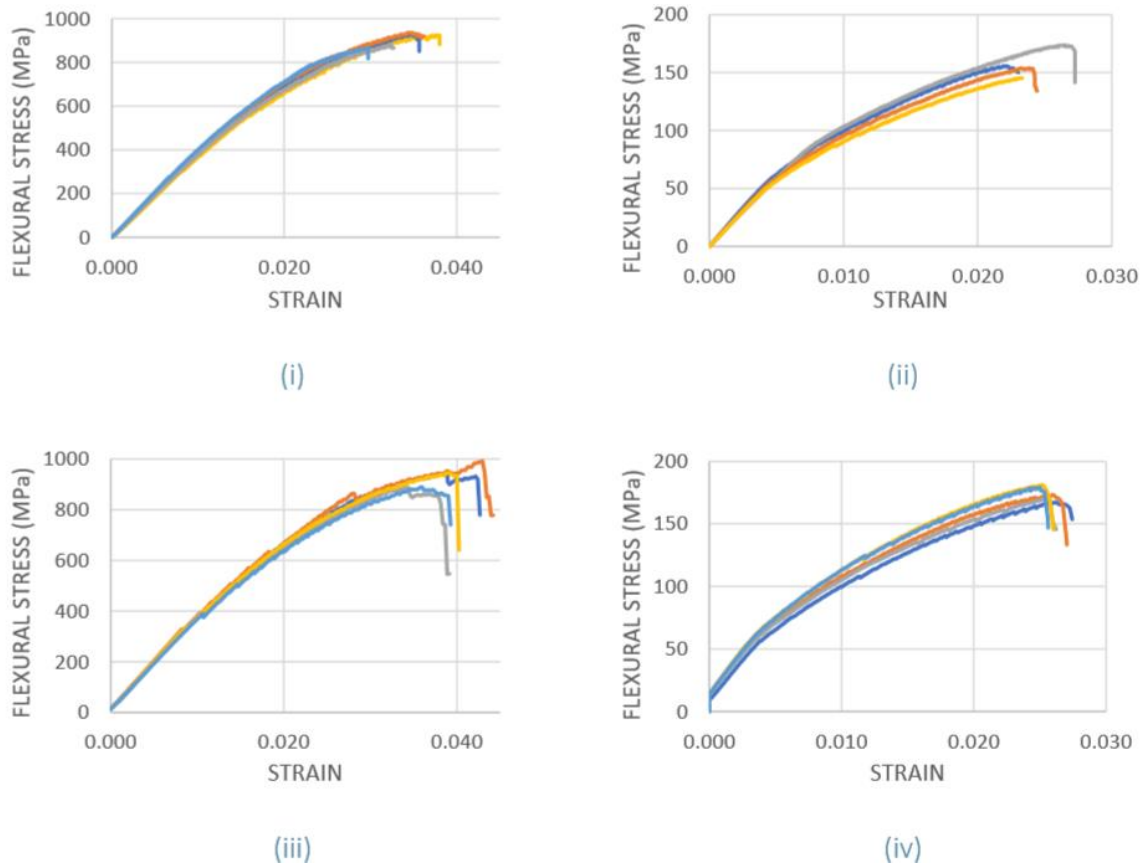
Para la determinación las dimensiones de las probetas para esta etapa se utilizó norma de BV y la norma NR546

Panels	Test types - Standards	Quantity of test pieces	Size of test pieces, in mm (1) (2)
Monolithic	Tensile test: ISO 527	<ul style="list-style-type: none"> • 5 in lengthwise direction of panel • 5 in crosswise direction of panel • 2 test pieces for calibration 	Length: 400 Width: <ul style="list-style-type: none"> • 25 where $e < 25$ • 30 where $25 < e < 30$ • 35 where $30 < e < 35$, etc.
	3-point bending test: ISO 14125	<ul style="list-style-type: none"> • 5 in lengthwise direction of panel • 5 in crosswise direction of panel • 2 test pieces for calibration 	Length: 200 Width: <ul style="list-style-type: none"> • 25 where $e < 25$ • 30 where $25 < e < 30$ • 35 where $30 < e < 35$, etc.
	Measurement of density: ISO 1183 Reinforcement content in weight: ISO 1172 (3)	4 samples	30 x 30
Sandwich	3-point bending test ISO 14125	<ul style="list-style-type: none"> • 5 in lengthwise direction of panel • 5 in crosswise direction of panel • 2 test pieces for calibration 	Length: 1000 (5) Width: $2 \cdot e$
	For both skins: Tensile test: ISO 527, or equivalent (4)	<ul style="list-style-type: none"> • 5 in lengthwise direction of panel • 5 in crosswise direction of panel • 2 test pieces for calibration 	Length: 400 Width: <ul style="list-style-type: none"> • 25 where $e < 25$ • 30 where $25 < e < 30$ • 35 where $30 < e < 35$, etc.
	For both skins: Measurement of density: ISO 1183 Reinforcement content in weight: ISO 1172 (3)	4 samples	30 x 30

(1) The Society may request additional tests with other sizes of test pieces.
 (2) e : Thickness, in mm, of the piece under test.
 (3) For laminate test panels reinforced with carbon and/or para-aramid fibres, the standard ASTM D3171 may be used.
 (4) Where both skins of the sandwich panel are fairly similar, tensile and density tests may be confined to one of the two skins.
 (5) The distance between the fixed rollers is to be not less than 600 mm (It is recommended to use a value roughly equal to 800 mm).

Tabla 5: Dimensiones de las probetas para la etapa 2 (NR546 BV). FiberShip (1).

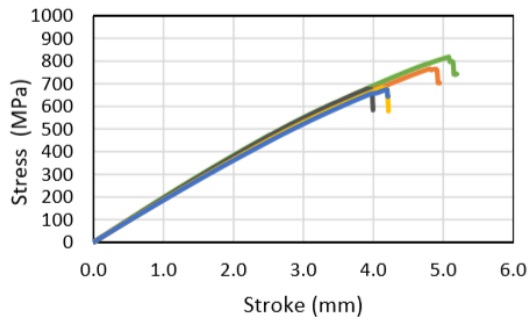
- Prueba de flexión, se realiza la prueba de tres puntos y se realizó en condiciones casi estática. Las probetas se secaron durante cuatro horas a 45 °C antes de la prueba. Se utilizó una longitud nominal de 80 mm y la velocidad de la prueba era de 1 mm por minuto. El diámetro del rodillo superior es de 10 mm y el de rodillo inferior de 4 mm. También se aplicó una precarga de unos 20 Newton. Las dimensiones de las probetas son de 200x35 mm y con un grosor de 3 mm.



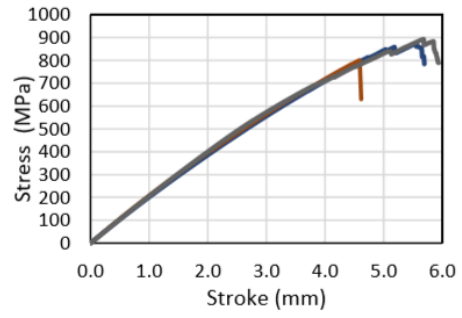
Il·lustració 8: Prova de flexió. (i) Leo 0° (ii) LEO 90° (iii) SR1125 0° (iv) SR1125 90°. FiberShip (1)

- Prueba de tracción, las muestras se secaron durante cuatro horas a 45 °C antes de la prueba. Se utilizó una velocidad de prueba de 6 mm/min. Las dimensiones nominales de las probetas fueron 300x25x3 mm. La rigidez a la tracción (Módulo de Young) se midió cargando las muestras hasta el 60% de la falla. Durante la carga, la deformación longitudinal se midió con extensómetros con un calibre de 50 mm de longitud. A continuación, se descargó la muestra, se retiraron los extensómetros y se estableció la resistencia a la tracción cargando la muestra hasta la rotura. Se informa de la resistencia a la tracción y la rigidez a la tracción (módulo de Young) tanto en la dirección longitudinal como en la transversal.

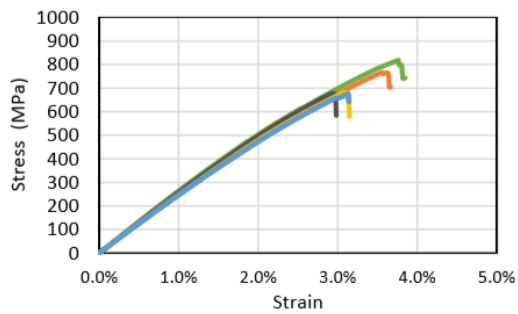
Los materiales compuestos.



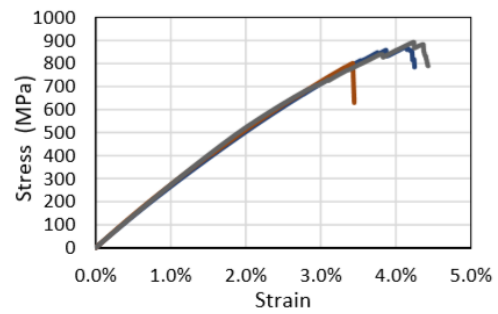
(i)



(ii)

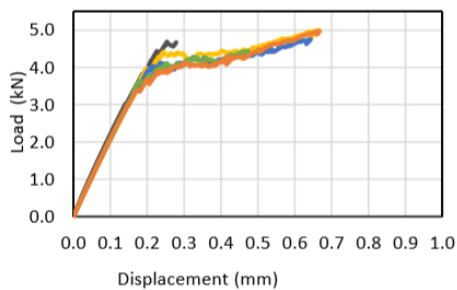


(iii)

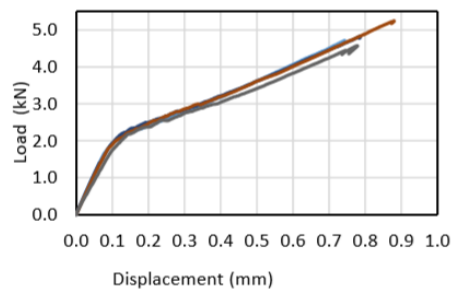


(iv)

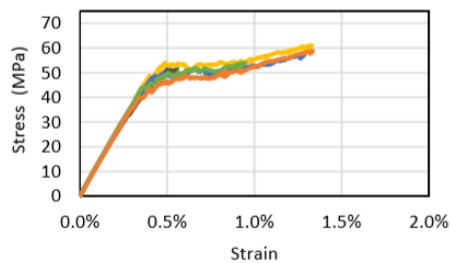
Ilustración 9: Prueba de tracción. (i) Leo 0° Fuerza- Desplazamiento (ii) SR1125 0° Fuerza- Desplazamiento (iii) Leo 0° Stress- strain (iv) SR1125 0° Stress-strain



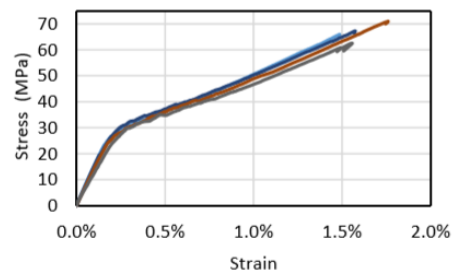
(i)



(ii)



(iii)



(iv)

Ilustración 10: Prueba de tracción. (i) Leo 90° Fuerza- Desplazamiento (ii) SR1125 90° Fuerza- Desplazamiento (iii) Leo 90° Fuerza-Tensión (iv) SR1125 90° Fuerza-Tensión . FiberShip (1)

- Prueba de sándwich de la fase II Las pruebas de sándwich de la fase II se realizaron en condiciones de carga casi estática. Se utilizó una disposición de tres puntos de flexión para probar las muestras de prueba del sándwich. Las dimensiones nominales de la probeta son 1000 mm x 60 mm x 30 mm.

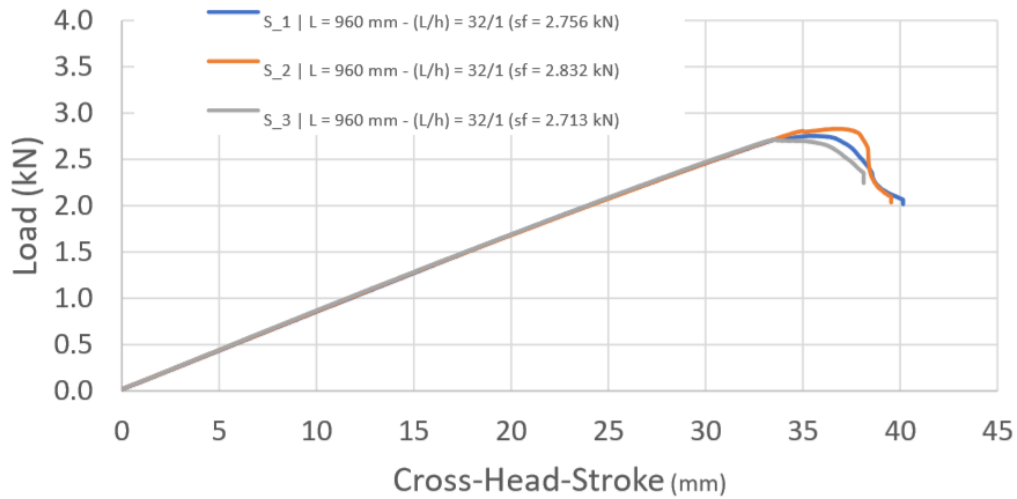


Ilustración 11: Prueba de sándwich, LEO con la capa final de vidrio-LEO y con núcleo de PVC. FiberShip (1).

Sample ID	Skin	Core	Support Span (mm)	Peak Load (kN)	CHS @ Failure (mm)	Failure Mode
S1	LEO – Glass (3 mm)	PVC (25 mm)	960	2.75	33.7	Core Crushing
S2	LEO – Glass (3 mm)	PVC (25 mm)	960	2.83	35.1	Core Crushing
S3	LEO – Glass (3 mm)	PVC (25 mm)	960	2.71	33.7	Core Crushing

Tabla 6: Resumen de las pruebas en sándwich. FiberShip (1)

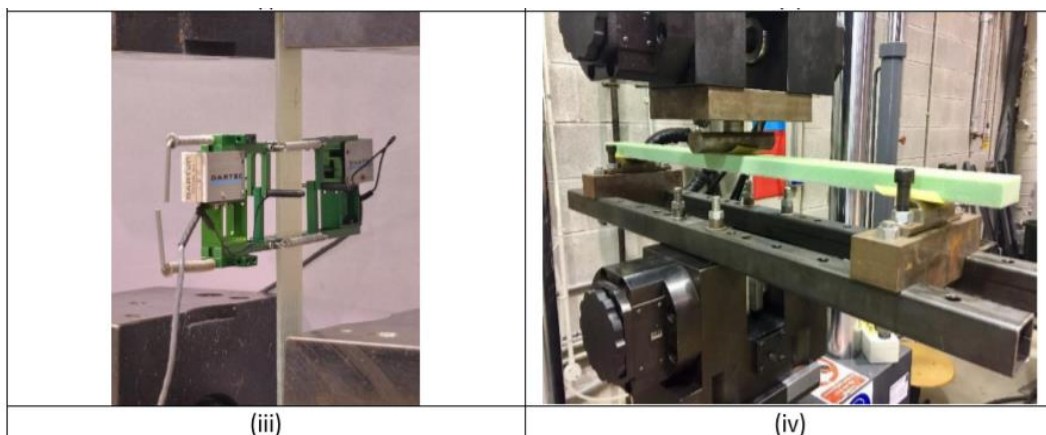


Ilustración 12:(ii) Prueba de tracción. (iv). Prueba de sándwich. FiberShip (1)

Los materiales compuestos.

Para seleccionar el material definitivo, se consideró la facilidad de realizar el laminado y el panel de sándwich, porque con la fibra de vidrio con núcleo de PVC se consiguió a la primera. En cambio, con la resina de SR1125 presentó varios problemas durante la producción de laminado porque la resina consistía en dos sustancias completamente son sustancias inmiscible que eran difícil de mezclar, la mezcla homogeneizada después de agitarla no era estable, separación de las dos sustancias la calidad de los laminado y sándwich era impredecible. También influyeron otros factores como el precio, la facilidad de infusión, la disponibilidad o el mejor comportamiento a fuego. Por eso se eligió el viniléster.

Table 11. Stage II flexural testing for down-selected resins (LEO vinylester and SR1125 epoxy)

RESIN CLASS	RESIN/ REINFORCEMENT	FLEXURAL STRENGTH 0° orientation	FLEXURAL MODULUS 0° orientation	FLEXURAL STRENGTH 90° orientation	FLEXURAL MODULUS 90° orientation
VINYLESTER	LEO SYSTEM LEO UD 940gsm Glass	906.9 MPa (3.4%)	39.4 GPa (4.6%)	157.2 MPa (7.7%)	12.5 GPa (5.3%)
EPOXY	SR1125 UD 996gsm Glass	929.5 MPa (4.6%)	36.69 GPa (4.5%)	174.4 MPa (3.3%)	13.4 GPa (3.0%)

Tabla 7: Resultado de la prueba de tracción, LEO y SR1125. FiberShip (1)

3.2. Sistema de SAERTEX LEO.

Habiendo seleccionado el sistema LEO como el mejor candidato para construir la mayor parte del casco en el proyecto *Fibreship*, a continuación, se describe con más detalle las características de este sistema. Este compuesto fue diseñado por la empresa SAERTEX. Es un sistema de material compuesto que cumple los requisitos más altos de protección contra el fuego en varios sectores como en el sector naval, sector de la construcción y en el sector ferroviario. A diferencia de otros sistemas, el sistema LEO no se ve afectado en sus propiedades mecánica. Además, se puede adaptar a las características que desea cada cliente. Para ello se deberá optimizar las capas que constituye el sistema como la fibra, el carbono, aramida, materiales híbridos y la resina especial LEO.

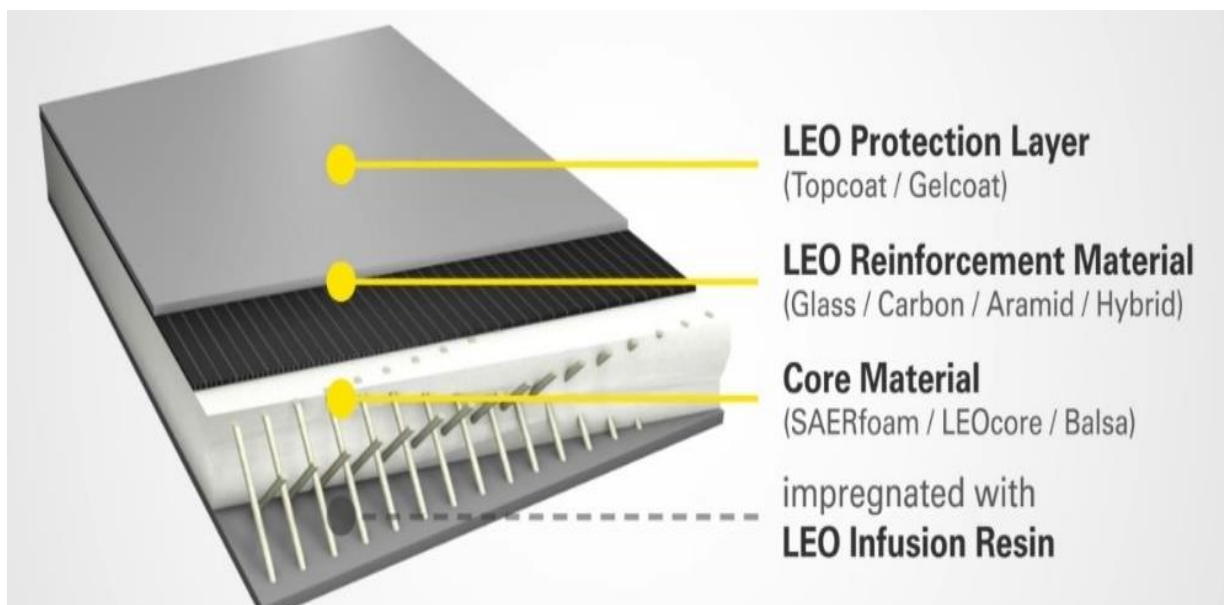


Ilustración 13: Estructura del material LEO. SAERTEX (5)

Los beneficios del sistema SAERTEX LEO son diversos y además cumplen con algunas normativas internacionales porque han superados los estándares de esas normativas, estos beneficios son los siguientes:

- Protección contra el fuego de acuerdo con la normativa europea EN 45545-2, también cumple los códigos estándares internacionales de las IMO de FTP (*Fire Test Procedures*)

Average heat release rate according to ISO 5660 (kW/m²)

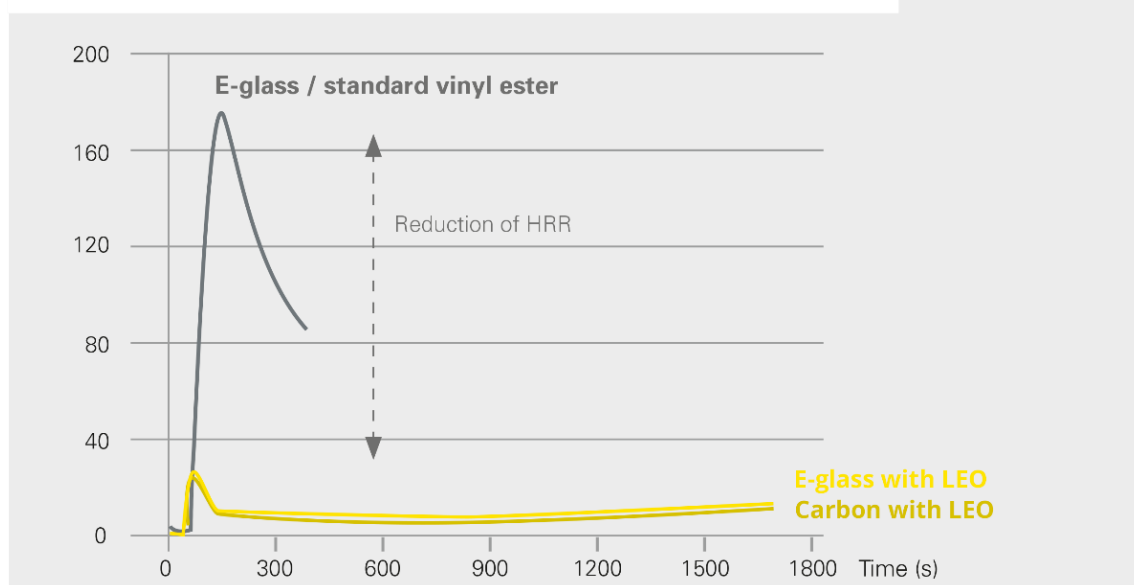


Ilustración 14: Resultado de la prueba realizada contra incendio. SAERTEX (5)

Los materiales compuestos.

- Material ligero con excelentes propiedades mecánicas, se ha realizado comparación con otro material compuesto.

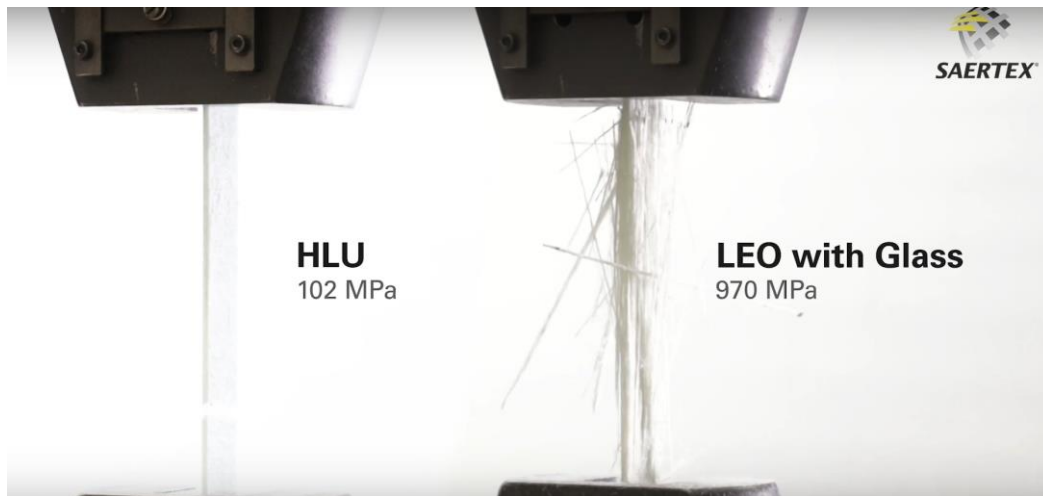


Ilustración 15: Comparación del material LEO, prueba a compresión. SAERTEX (5)

A continuación, se mostrará una gráfica donde se podrá apreciar que las propiedades mecánicas del material compuesto LEO no se ve afectada a comparación con HLU (Hand Lay- Up), estando en las mismas condiciones.

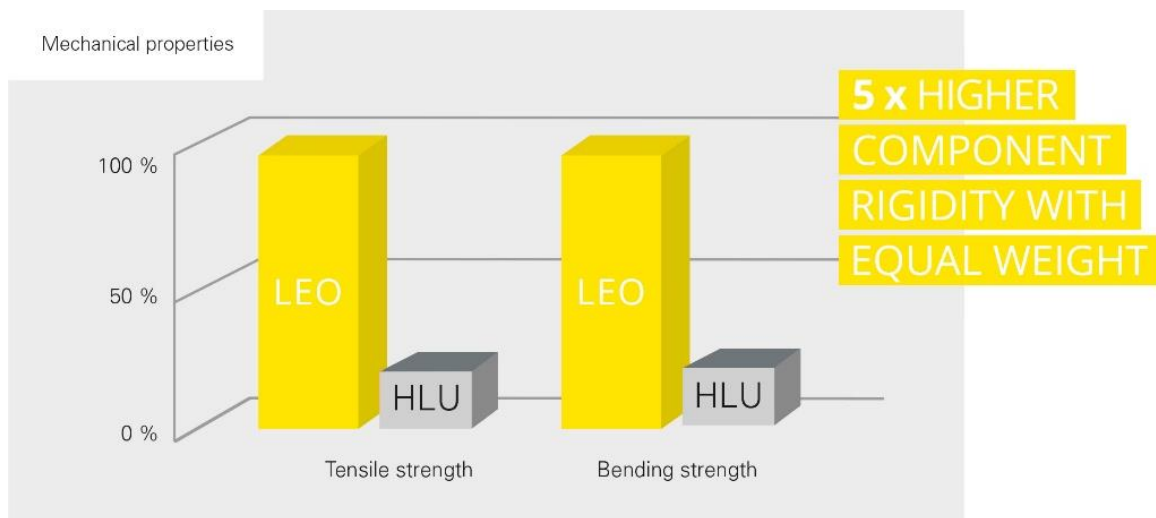
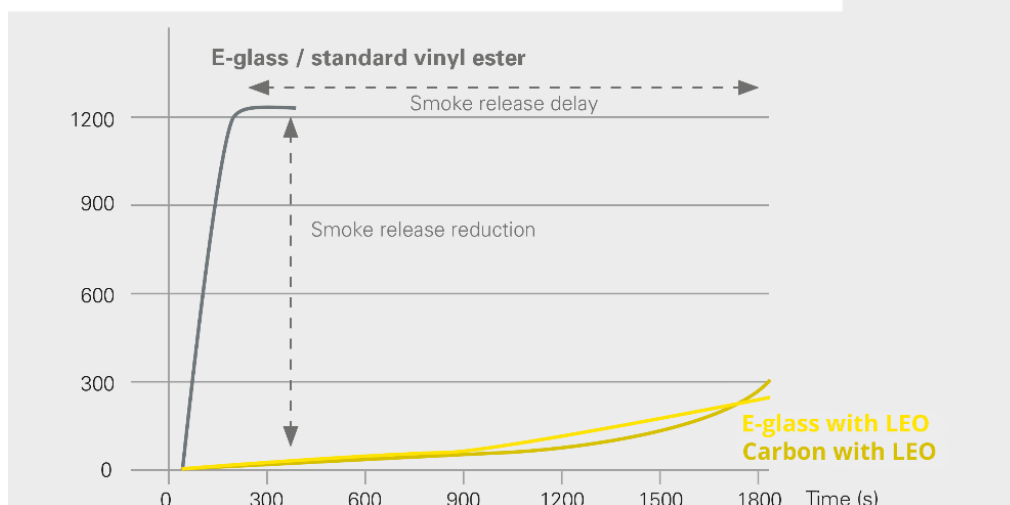


Ilustración 16: Eficiencia de las propiedades mecánicas. SAERTEX (5)

También se realizaron diversa prueba en estructuras sencilla y los resultados se mostrarán en la ilustración 19, donde se podrá apreciar que las propiedades mecánicas de LEO destacan.

- Resistencia a la intemperie.
- Alta eficiencia económica.
- Seguridad de toxicológica, como por ejemplo está libre de halógenos.

Average smoke release rate according to ISO 5660 (m²/m²)



Il·lustració 17: Comparación de toxicidad. SAERTEX (5)

Estas son las normativas que cumple el sistema LEO en distintos sectores industrial.

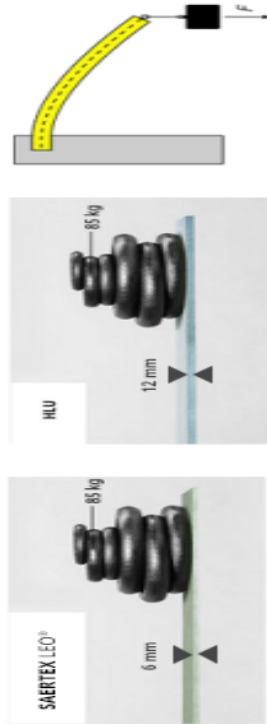
MARINE	RAIL	CONSTRUCTION	OTHERS
IMO RES. A 653 (16) FTP CODE MSC 61 (67) Annex 1 Part 2 Annex 1 Part 5 Annex 1 Part 3 Annex 1 Part 10	DIN EN 45545-2:2016 HL 2 / 3 for R1 HL 2 / 3 for R7 HL 2/ 3 for R17	EN ISO 13501-1:2017 B - s2,d0	STANAG 4602 AFAP 4/5 - F2 AFAP 2 - S2 AFAP 3 - T1
IMO FTP Code; Part 10 HSC 2000 (ISO 9705) > 9 min 46	DIN 5510 S4/SR2/ST2	DIN 4102-1 B1	
DIN 4102-1 B1	NFF 16-101 UNE 23.721:1990 M1 / F1	NFF 16-101 M1 / F1	
ASTM E 84 class A / class 1	BS 6853 BS 476-6 - class 0 BS 476-7 - class 1 BS 6853, Annex B cat1b exterior cat 2 interior	ASTM E 84 class A / class 1	

Il·lustració 18: Normativas que cumple el material. SAERTEX (5)



SAERTEX LEO®: COMPARISON OF MATERIALS

Parameter	Reference (Hand Laminate)	LEO-Variations (Infusion)		Aluminium
		LEO UD -stiff-	LEO UD -light-	
E-Modulus 0° [GPa]	8,3	42,5	42,5	70
Material Thickness [mm]	11,84	11,9	6,72	11,5
Weight [g]	3,036	3,259	1,833	4,65
Bending [mm]	96,78	18,43	103,38	12,5
Result	Reference	approx. 7 % heavier	approx. 40% lighter	approx. 50 % heavier
		5 x stiffer	Similar stiffness	7 x stiffer



„Bending Beam“			
Parameter	Reference (Hand Laminate)	LEO-Variations (Infusion)	
		LEO UD -stiff-	LEO UD -light-
Lay-up	5 x mat (450 g/m ²)	5 x UD (970 g/m ²)	4 x UD (970 g/m ²)
Fibre Volume Fraction	19 %	50 %	50 %
Resin Density [kg/dm ³]	1,5	1,04	1,04
E-Modulus 0° [Gpa]	8,3	42,5	16,5
Material Thickness [mm]	3,64	3,73	2,24
Weight [g]	156	170	102
Bending [mm]	208	37,8	174
Result	Reference	approx. 8 % heavier	approx. 35 % lighter
		5,5x stiffer	approx. 1,2 x stiffer

Ilustración 19: Comparación de materiales. SAERTEX (5)

4. MODELO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

4.1. Comportamiento lineal de los materiales.

El comportamiento lineal queda determinado por la matriz de rigidez, esta matriz establece una relación entre las tensiones y las deformaciones de los materiales, extraído de los apuntes de cálculos numérico de estructura naval (6).

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\nu_{yx} & -\nu_{zx} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{yx}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & -\nu_{zy} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{zx}}{E_x} & \frac{-\nu_{zy}}{E_y} & \frac{1}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{Bmatrix} \quad [4.1]$$

Las propiedades mecánicas de compuesto quedaran determinadas por las contantes elásticas que son las siguientes $E_x, E_y, E_z, \nu_{xy}, \nu_{xz}, \nu_{yz}$ y G_{xy}, G_{xz}, G_{yz} .

Los materiales se pueden clasificar en dos grandes grupos que son materiales isotrópico y anisotrópico. Los materiales isotrópicos son aquellos que sus propiedades son las misma en todas las direcciones y en cambio un material anisotrópico son materiales que sus propiedades son distinta en cada dirección. **Los materiales compuestos son anisotrópicos.**

4.2. Análisis de materiales compuestos.

Para realizar los cálculos del comportamiento de los materiales compuestos hay dos métodos, el primero es experimental y el segundo es a partir de las propiedades de la fibra y la matriz.

Las propiedades del compuesto quedarán determinadas por las constantes elásticas que son la siguiente, este caso es tridimensional.

$$E_x, E_y, E_z$$

$$\vartheta_{xy}, \vartheta_{xz}, \vartheta_{yz}$$

$$G_{xy}, G_{xz}, G_{yz}$$

4.2.1. Teoría de mezcla clásica (Paralelo)

La teoría de mezcla clásica se usa para simular el comportamiento no-lineal de un material compuesto. La primera formulación fue formulada por Trusdell y Toupin, esta formulación parte de dos hipótesis. La primera hipótesis es que todos los materiales que forma el compuesto sufren la misma deformación y la segunda hipótesis es que cada material que forma el compuesto contribuye a la tensión final proporcionalmente a su participación volumétrica.

Esta primera formulación hecha por Trusdell y Toupin fue mejorada por Car (7) a partir de esta nueva formulación se podrá tener en cuenta el comportamiento no-lineal del compuesto.

La teoría de mezcla en paralelo formulada por Car (7) debe cumplir las siguientes condiciones de compatibilidad que son las siguientes:

- a. Cada volumen infinitesimal del compuesto deberá contener N elementos de los materiales.
- b. El comportamiento general del compuesto estará influenciado proporcionalmente por la participación volumétrica de cada material que forma el compuesto.
- c. El volumen de cada material que forma el compuesto deberá ser menor que el volumen del total del compuesto.
- d. La unión de los materiales que forma el compuesto se considerará perfecta.
- e. Todos los materiales del compuesto sufrirán la misma deformación es decir tendrán una condición de iso-deformación.

4.2.2. Participación volumétrica.

La participación volumétrica de un material compuesto se calcula de la siguiente manera:

$$K_i = \frac{V_i}{V_{Tot}} \quad [4.2]$$

Se deberá cumplir que en compuesto con n componentes:

$$\sum_{i=1}^n K_i \leq 1 \quad [4.3]$$

Por lo general el volumen total del material compuesto V_{Tot} se define de la siguiente forma:

$$V_{Tot} = V_f + V_m \quad [4.4]$$

$$K_f = \frac{V_f}{V_{Tot}}, K_m = \frac{V_m}{V_{Tot}} \quad [4.5]$$

Donde la participación volumétrica entre la matriz y la fibra no debe ser superior a 1, esto se demostrará a continuación igualando las ecuaciones [4.4] y [4.3]:

$$K_f + K_m = \frac{V_f}{V_{Tot}} + \frac{V_m}{V_{Tot}} = \frac{V_{Tot}}{V_{Tot}} = 1 \quad [4.6]$$

Hay dos formas de medir o calcular la participación volumétrica, la primera es a priori donde se mide el volumen de fibra y se mide el volumen final. Para ello se asume que las participaciones volumétricas de la fibra y la participación volumétrica de la matriz deben sumar uno [4.6].

$$K_f + K_m = 1 \quad [4.7]$$

$$V_m = V_{Tot} - V_f \quad [4.8]$$

La segunda forma de calcular la participación volumétrica es a posteriori, este método se mide el volumen total del compuesto y luego se elimina la matriz para poder medir el volumen de la fibra. También se elimina la disolución y el proceso de infusión. Además, se asume que la suma de volumen de fibra y matriz es igual a uno. Quedando lo mismo de la ecuación [4.6].

4.2.3. Modulo longitudinal.

El módulo longitudinal se calculará en la dirección que esta la fibra para facilitar la deducción de este módulo se usará las fórmulas de ROM (*rules of mixtures*). La suposición principal de este punto para realizar la deducción de la formulación es que las tensiones en la dirección de las fibras son las misma en la matriz y en la fibra, esto implicara que la unión de del compuesto entre la fibra y la matriz es perfecta.

De tal forma que, al estirar el compuesto en la dirección de la fibra, la matriz y la fibra tiene un alargamiento igual como se puede apreciar en la figura 20.

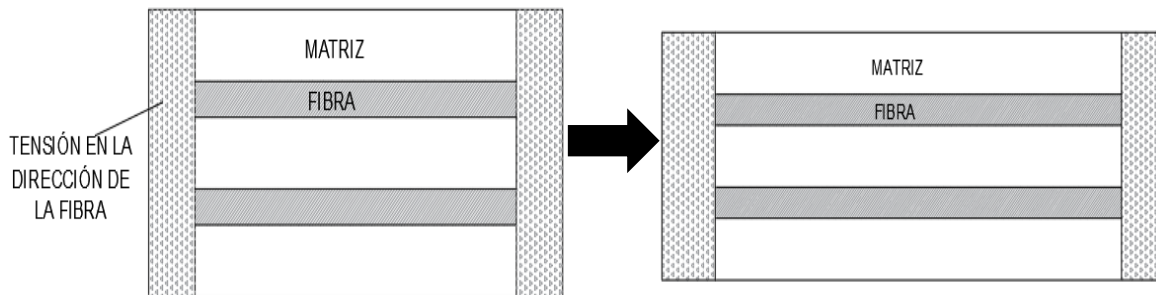


Ilustración 20: Alargamiento del compuesto en paralelo.

La realización de esta suposición es necesaria para poder realizar la sustitución de un material heterogéneo por otro material homogéneo en el RVE.

$$E_1 = E_f \cdot K_f + E_m \cdot K_m \quad [4.9]$$

4.2.4. Teoría de mezcla en serie.

Las condiciones de la teoría de mezcla en paralelo no siempre se cumplen tal como se puede ver con en el ejemplo de la figura 21.

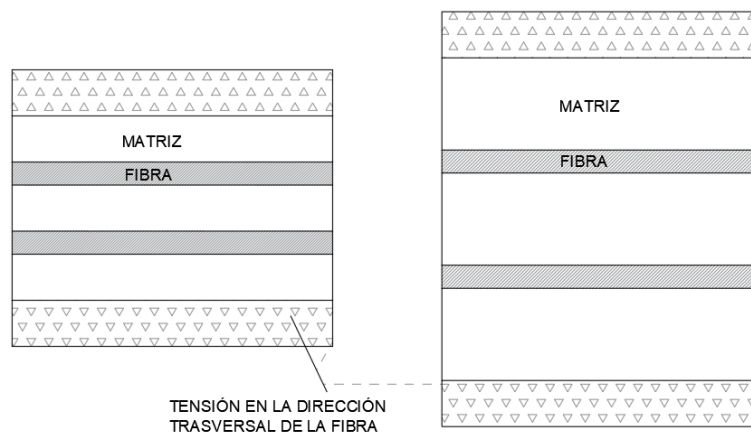


Ilustración 21: Alargamiento del compuesto en serie.

Para este caso se necesita la teoría de mezclas en serie que tiene las siguientes consideraciones, las tensiones del compuesto, fibra y matriz se asume que son iguales:

$$\sigma_c = \sigma_f = \sigma_m \quad [4.10]$$

$$E_c = K_f \cdot \varepsilon_1 + K_m \cdot \varepsilon_m \quad [4.11]$$

Modelo para la caracterización de los materiales

Donde se asumirá que los materiales son elásticos:

$$\begin{aligned}\sigma_f &= E_f * \varepsilon_f \\ \sigma_m &= E_m * \varepsilon_m\end{aligned}\quad [4.12]$$

Para obtener una fórmula empírica para el módulo transversal se realizarán varias operaciones matemáticas, que se mostrará a continuación:

- Aislar ε_f y ε_m , de las ecuaciones [4.12].

$$\varepsilon_f = \frac{\sigma_f}{E_f}; \varepsilon_m = \frac{\sigma_m}{E_m}$$

- Substituir las ecuaciones anteriores en la ecuación [4.11]:

$$\sigma_c = K_f * \varepsilon_f + K_m * \varepsilon_m = K_f * \frac{\sigma_f}{E_f} + K_m * \frac{\sigma_m}{E_m}$$

- Se considera la condición de [4.10]

$$\begin{aligned}E_c &= K_f * \frac{\sigma_c}{E_f} + K_m * \frac{\sigma_c}{E_m} = \left[\frac{K_f}{E_f} + \frac{K_m}{E_m} \right] * \sigma_c \\ \sigma_c &= \left[\frac{K_f}{E_f} + \frac{K_m}{E_m} \right]^{-1} * \varepsilon_c\end{aligned}$$

La fórmula empírica obtenida para el módulo transversal mediante la teoría de mezcla inversa es la siguiente:

$$\sigma_c = \left[\frac{K_f}{E_f} + \frac{K_m}{E_m} \right]^{-1} \quad [4.13]$$

4.2.5. Módulo de cizalladura.

El módulo de cizallamiento en el plano $\sigma_6 = \tau_{12} = \tau_{21}$ deforma el compuesto como en la ilustración 22. La aproximación de la resistencia del material conduce a una regla inversa de la ecuación de mezclas para el módulo de cizallamiento en el plano quedando de la siguiente forma.

$$G_{12} = \frac{1}{\frac{K_m}{G_m} + \frac{K_f}{G_f}} \quad [4.14]$$

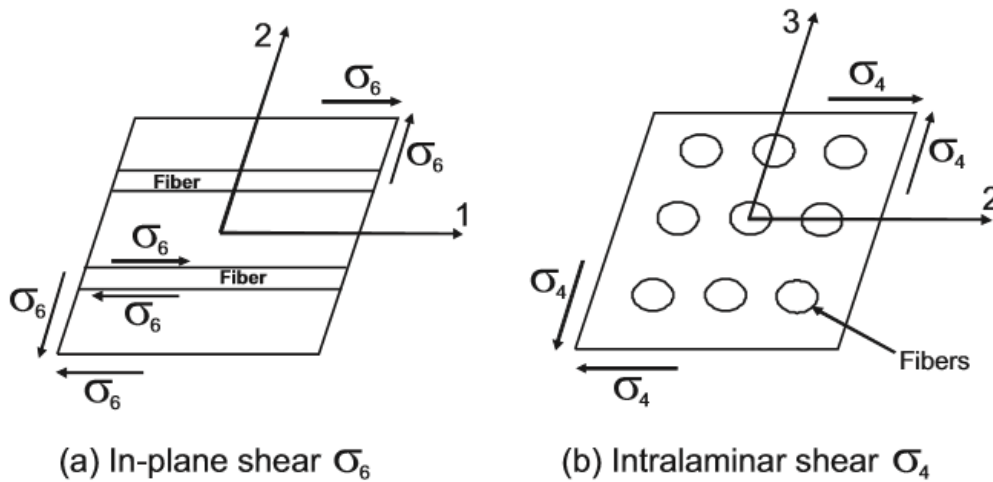


Ilustración 22: Diferencia entre el módulo de cizalladura en el plano de un material compuesto y otro normal. (2)

4.2.6. Coeficiente de poisson

La relación de coeficiente de poisson se define como el resultado de la deformación en una dirección dividida por la deformación en la otra dirección.

$$v_{ij} = -\frac{\epsilon_j}{\epsilon_i} \quad [4.15]$$

El coeficiente de poisson en materiales compuesto se usa una aproximación porque el coeficiente es similar entre la fibra y la matriz. También, se usa una aproximación porque los coeficientes de poisson son difíciles de medir especialmente la de la fibra, porque son materiales isotrópicos un ejemplo es la fibra de carbono.

La aproximación que se usa es la siguiente:

$$v_{12} = v_f \cdot K_f + v_m \cdot K_m \quad [4.16]$$

4.2.7. Teoría de mezcla serie-paralelo

En este subapartado se explicará la formulación de mezcla series-paralelo que permitirá la simulación del comportamiento mecánico de los materiales compuestos que tiene comportamiento no lineal. La siguiente formulación se podrá aplicar a los compuestos laminados como la fibra de carbono o en este caso será el material compuesto denominado LEO.

A continuación, se mostrará las condiciones en la que se basa la teoría de mezclas serie-paralelo:

- A. El compuesto estará formado por dos materiales que serán la matriz y la fibra.
- B. La deformación de los materiales que constituye el compuesto será la misma en la dirección que esta orienta la fibra es decir en la dirección en paralelo.
- C. La tensión es la misma en la dirección en serie.
- D. La respuesta del compuesto estará relacionada con la proporción volumétrica de cada material que lo forman.
- E. Los materiales que constituye el compuesto tendrán una distribución homogénea en el compuesto.
- F. Y por último se considerará que la unión de la fibra y matriz será perfecta.

4.2.8. Componente en serie y en paralelo.

Como el comportamiento del compuesto será diferente en la dirección en serie o paralelo por eso se deberán definir los componentes en series o paralelos [4.17]. Para definir estos componentes se realizará mediante dos tensores complementarios de cuarto orden los cuáles se denominarán de la siguiente manera, en dirección en serie P_s y en dirección paralelo (P_p).

Estos tensores se pueden considerar de dos formas, la primera forma se considera la dirección X está en paralelo y las demás direcciones están en serie, y el segundo caso se considera las direcciones X y Z están en paralelo y la otra dirección en serie.

$$\varepsilon = \varepsilon_p + \varepsilon_s \quad [4.17]$$

Primera forma la dirección X (en este caso será igual $x=e_1$) es en paralelo y el resto en serie.

Quedando los tensores en paralelo:

Donde: [4.18]

$$\varepsilon_p = \mathbb{P}_p : \varepsilon$$

$$e_1 = (1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)$$

$$\mathbb{P}_p = e_1^T \rightarrow \mathbb{P}_p = e_1 \quad [4.19]$$

$$\mathbb{P}_P \cdot \bar{\sigma} = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{bmatrix} = \sigma_x$$

$$\mathbb{P}_P = \sigma_p = [\sigma_x] \quad [4.20]$$

Quedando los tensores en series:

$$\varepsilon_S = \mathbb{P}_S : \varepsilon \quad [4.21]$$

$$\mathbb{P}_S = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [4.22]$$

$$\mathbb{P}_S \cdot \bar{\sigma} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{bmatrix}$$

$$\mathbb{P}_S = \bar{\sigma}_S = \begin{bmatrix} \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{bmatrix} \quad [4.23]$$

La segunda forma, las direcciones X y Z están en paralelo, seguiríamos el mismo procedimiento que la primera forma y los resultados son los siguientes:

$$\mathbb{P}_P \cdot \bar{\sigma}_P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_X \\ \sigma_Z \end{bmatrix}$$

$$\mathbb{P}_p = \bar{\sigma}_p = \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_z \end{bmatrix} \quad [4.24]$$

$$\mathbb{P}_s \cdot [\sigma] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_y \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{bmatrix} \quad [4.25]$$

$$\mathbb{P}_s = \bar{\sigma}_s = \begin{bmatrix} \sigma_y \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{bmatrix}$$

4.3.FORMULACION DEL DAÑO

La degradación del material de un sólido es causado por el proceso de fractura y puede ser simulada con la formulación de daño. Esta formulación de daño tiene en cuenta la reducción de las propiedades de rigidez y resistencia en función de la reducción del área efectiva del material.

El procedimiento propuesto para simular esta formulación es el proceso de delaminación que utiliza la ley constitutiva de daño para predecir el rendimiento mecánico de la matriz.

La principal característica del proceso de delaminación es que la degradación del material es permanente, en decir que una vez dañado el material no recupera sus características iniciales de rigidez y resistencia.

4.3.1. Modelo de daño isotrópico.

El proceso de daño puede ser simulado en la mecánica de lo continuo mediante la introducción de variable interna en este caso la variable es M , que representará el nivel de daño en el material. Esto transformará el tensor de tensiones real (σ) en un tensor de tensiones efectivo (σ_0).

$$\sigma_0 = M^{-1} : \sigma \quad [4.26]$$

En el caso del daño isótropo, todas las direcciones del tensor de esfuerzo tienen la misma degradación. Por esto la variable interna del daño puede ser transformada en un parámetro escalar y la relación entre las tensiones reales y la efectiva pueden ser escrita de la siguiente manera:

$$\sigma = [(1 - d)I]; \sigma_0 = (1 - d)\sigma_0 \quad [4.27]$$

Donde la d será la variable interna del daño. El valor de esta variable estará comprendido entre los valores 0 y 1. El valor 0 corresponde al material cuando el material no está dañado, y en las tensiones reales y efectiva son iguales. Y el valor 1 corresponde al material cuando está completamente dañado y en este caso las tensiones reales del material valen 0.

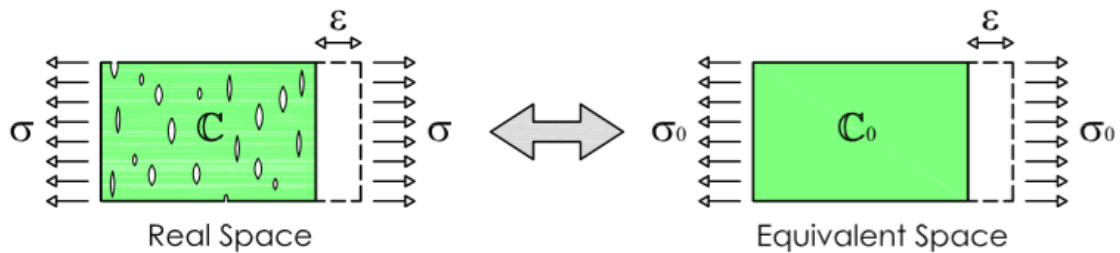


Ilustración 23: Espacio real y espacio real equivalente. (8).

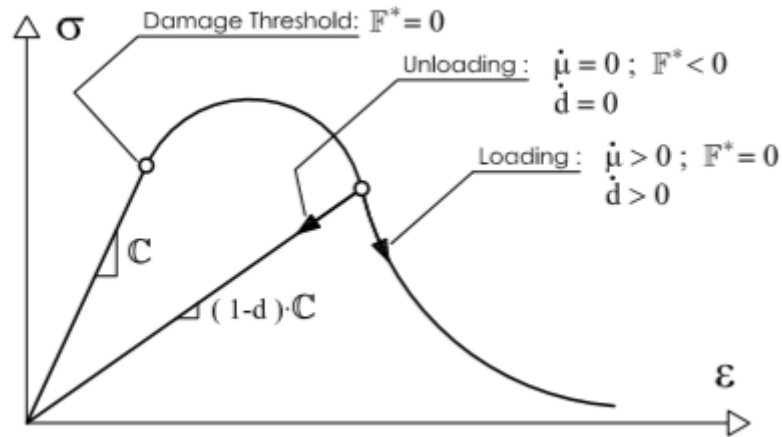
La ilustración 23 muestra que la deformación asociada a un estado dañado será equivalente a la deformación asociada al estado no dañado equivalente y la tensión es la tensión efectiva. Este caso corresponde a la equivalencia de tensiones cuando las tensiones es la misma en las configuraciones dañada y efectiva. Si se asume la equivalencia de energía entre ambas configuraciones se podrá obtener unas series de ecuaciones.

Con la suposición de equivalencia de la deformación, la tensión efectiva se podrá obtener a partir de las deformaciones utilizando el tensor de rigidez efectiva del compuesto. Esto corresponde al tensor elástico cuando no está dañado el compuesto. Se definirá de la siguiente manera:

$$\sigma_0 = C_0 : \varepsilon \quad [4.28]$$

Y por lo tanto el tensor de esfuerzo se obtendrá a partir de las ecuaciones [4.27] y [4.28], quedando de la siguiente forma:

$$\sigma = (1 - d)\sigma_0 = \frac{(1 - d)C_0}{c} : \varepsilon \quad [4.29]$$



Il·lustraci3n 24: Esfuerzo vs deformaci3n para energa de fractura (9).

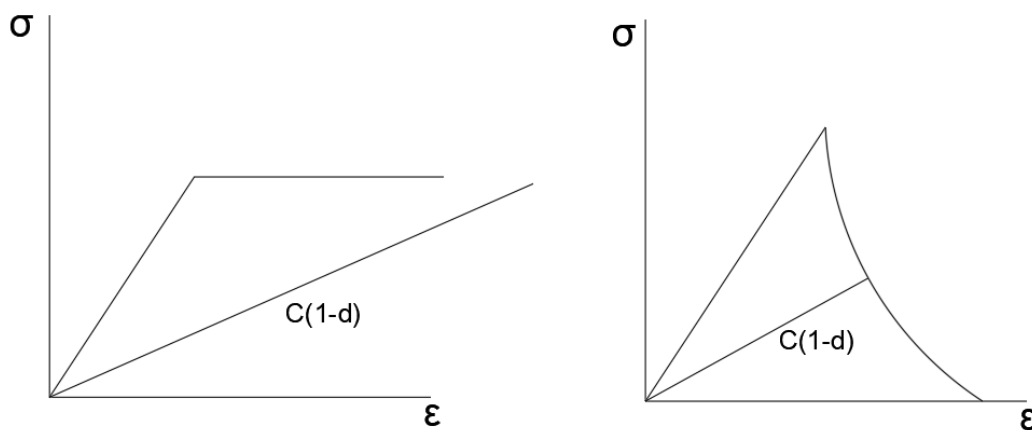
4.3.2. Energfa de fractura

La mecánica de fractura clásica (o propiedad dúctil) se define como la disipaci3n de energfa necesaria para realizar una fractura en un área unitaria del material estudiado. Esta energfa de fractura se define de la siguiente forma:

$$G_f = \frac{W_f}{A_f} \quad [4.30]$$

Cuando el trabajo W_f es la energfa disipada por la fractura al final del proceso y A_f es el área de la fractura.

Los materiales pueden tener mucha energfa de fractura (muy dúctil) o poca energfa de fractura (poco dúctil). A continuaci3n, se mostrará los dos tipos:



Il·lustraci3n 25: Izquierda material con mucha energfa de fractura y derecha con muy poca energfa de fractura.

5. COMPORTAMIENTO DE LAS FORMULACIONES UTILIZADAS.

En este apartado se describirán los modelos de cálculo realizados empleando las estructuras de geometrías simple, con los que se evaluarán las distintas formulaciones que se utilizarán en la simulación de la unión de materiales compuestos. El análisis de estas estructuras permitirá familiarizarse con el programa PLCd (Plastic Crack Dynamic Code). PLCd es un código de elementos finitos para realizar la simulación numérica del comportamiento dinámico no lineal de estructuras, con grandes deformaciones y pequeñas deformaciones, análisis térmicos y termo-mecánicos acoplados en estructuras sólidas. Este código esta desarrollado por el CIMNE (Centro Internacional de Métodos Numéricos Ingeniería) y el departamento de estructuras y resistencia de materiales de la UPC (Universidad Politécnica de Cataluña).

Otra cosa que se realiza en este apartado son las descripciones de los modelos con soluciones analíticas que son los modelos 1, 2, y 3, un modelo sin solución analíticas que es el modelo 5 y por último un modelo de calibración de material compuesto para ver el comportamiento de la teoría serie-paralelo que es el modelo experimental.

Estos modelos permitirán familiarizarse con el programa GID en particular con las funciones de cálculos de pre-proceso del complemento llamado PLCd (*Plastic Crack dynamic*).

5.1. Definición de las unidades del programa.

Una de las cosas que se deberán tener en cuenta antes de comenzar a trabajar con el programa GID es que no tiene unidades por lo tanto se deberá ser coherente con las unidades que se utilizarán durante la realización de los modelos y a continuación se mostrará un listado de algunas de las unidades que se utilizadas.

	UNIDADES
Módulo de Young	$\frac{N}{mm^2}$
Longitud	mm
Fuerza	N
Energía de fractura	mJ/mm^2
Densidad	Tn/mm^3
Momento	$N \cdot mm$

Tabla 8: Algunas unidades que se utilizaran en el proyecto.

5.2. Propiedades de los materiales

En este subapartado se encontrarán las propiedades de los materiales que se utilizaran durante la realización de este proyecto, algunos de estos materiales ya vienen predefinidos en el programa como el aluminio, la fibra de carbono, resina epoxi y fibra de vidrio. Otros materiales como el acero, material denominado Fibra de vidrio LEO y Viniléster de LEO, no vienen definido en el programa por lo tanto habrá que definirlo.

Para definir un nuevo material dependerá si se trata de un material isótropo o anisótropo, se deberá introducir los parámetros necesarios.

Ilustración 26: Derecha material isótropo e izquierda material anisótropo.

5.2.1. Acero

Propiedad del material	MAGNITUD
Tipo	Isótropo
Módulo de Young	200000 MPa
Módulo de Poisson	0.3
Densidad	7850 $\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$

Tabla 9: Características del acero.

5.2.2. Fibra de carbono

Propiedad del material	MAGNITUD
Tipo	Anisótropo
Módulo de Young XX	242000 MPa
Módulo de Young YY	28000 MPa
Módulo de Young ZZ	28000 MPa
Módulo de Poisson XY	0,20
Módulo de Poisson YX	0,02314
Módulo de Poisson XZ	0,20
Módulo de Poisson ZX	0,02314
Módulo de Poisson YZ	0,20
Módulo de Poisson ZY	0,20
Densidad	1800 $\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$

Tabla 10: Características de la fibra de carbono.

5.2.3. Epoxi

Propiedad del material	MAGNITUD
Tipo	Isótropo
Módulo de Young	4670 MPa
Módulo de Poisson	0,38
Densidad	1800 $\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$

Tabla 11: Características del epoxi.

5.2.4. Fibra de vidrio LEO.

Propiedad del material	MAGNITUD
Tipo	Isótropo
Módulo de Young	72000 MPa
Coefficiente de poisson	0,22
Módulo de corte	1660 MPa
Resistencia a la tracción	1704 MPa
Fuerza de compresión	1500 MPa
Fuerza de cizalladura	1704 MPa
Energía de fractura	18500 J/m ² = 18,5 mJ/mm ²

Tabla 12: Características de la fibra de vidrio LEO.

5.2.5. LEO viniléster

Propiedad del material	MAGNITUD
Tipo	Isótropo
Módulo de Young	3400 MPa
Coefficiente de poisson	0,22
Módulo de corte	455 MPa
Resistencia a la tracción	50 MPa
Fuerza de compresión	80 MPa
Fuerza de cizalladura	71 MPa
Energía de fractura	1300 J/m ²

Tabla 13: Características del LEO viniléster

Compuesto		56 % Fibra
E	5528,00	MPa
E2=E3	4826,50	MPa
Nu12	0,255	
Nu21	0,223	
G	766,65	MPa
Su	1172,00	MPa
Gf	1093,20	MPa

Tabla 14: Características del compuesto LEO.

5.3. Cómo se procederá en el estudio de cada Modelo:

Para ser un poco estructurado a la hora de realizar los modelos se seguirá la metodología siguiente, esta metodología puede variar en algunas situaciones mientras se realiza el trabajo y eso dependerá de los problemas que vayan surgiendo.

Lo primero que se hará en cada modelo es hacer una descripción de las estructuras, la sección, la longitud, el material que conformará la estructura y carga aplicada.

Luego se procederá a realizar el programa GiD, que se usa como pre-procesador para definir el archivo de cálculo, y como post-procesador para analizar los resultados. Una vez hecha la estructura se procederá a resolver el problema mediante el programa de elementos finitos PLCd. A continuación, se definirá si el material a emplear tendrá un comportamiento lineal o no lineal, si es el caso de comportamiento no lineal se procederá a realizar el modelo de daño no-lineal (Véase anexo B).

A continuación de haber definido el comportamiento del material se procederá a aplicar las condiciones de borde, que esto incluye la fuerza aplicada, si es sobre una línea o

una superficie, las partes fijadas en el modelo como las superficies y líneas. También se definirá las divisiones (n) que se realizan en la sección transversal del modelo.

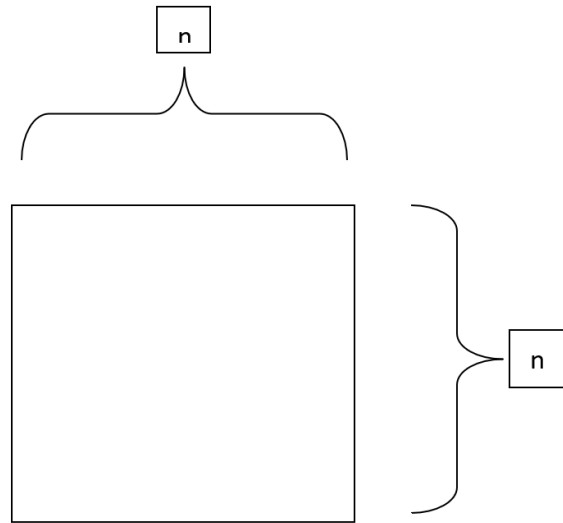


Ilustración 27: Divisiones de n , de los modelos a estudiar.

Después se realiza el tipo de mallado que más se ajuste al modelo, principalmente será de las siguientes características, de apesto estructurado, los elementos será hexaedros y por último el orden de integración del elemento que puede ser lineal o cuadrático. (Para ver la diferencia de los tipos cuadrático véase el anexo C).

Una vez definidas las condiciones de borde y tipo de mallado, se procederá a dar las condiciones para realizar los cálculos. Los primeros modelos no se realizan modificaciones, pero a partir del modelo 4 se procederá a realizar modificación en el apartado del PLCd *stages*.

Luego se recopilarán y procesarán los datos obtenidos, para realizar diversos diagramas, especialmente el diagrama de máxima tensión.

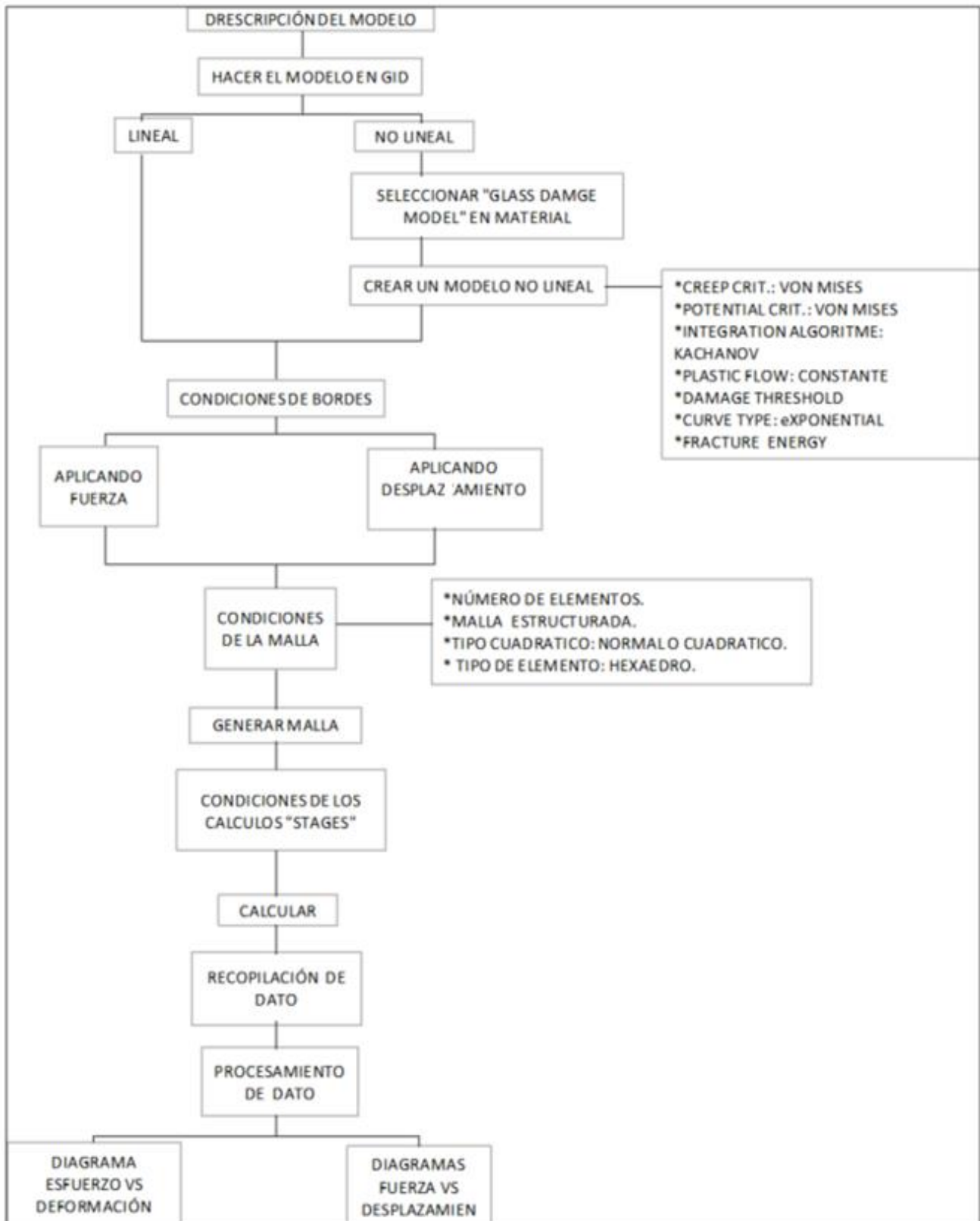


Ilustración 28: Referencia de cómo se procederá en cada modelo.

5.4. Modelo 1

La estructura del Modelo 1 está formada por una viga de perfil rectangular de 200x200 mm y una longitud de 4000 mm. Empotrada por uno de su lado y con una carga aplicada en el otro extremo de 40 KN.

El material que se usará en este modelo será el acero y se considerará que tendrá un comportamiento lineal.

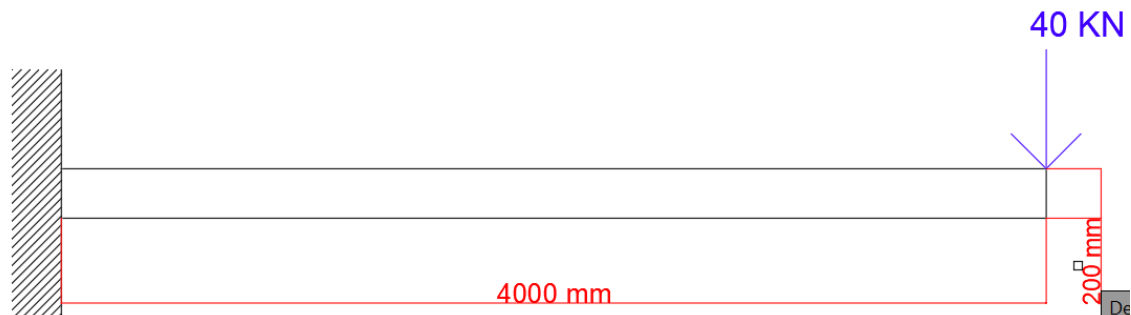


Ilustración 29: Modelo 1, medidas y carga aplicada.

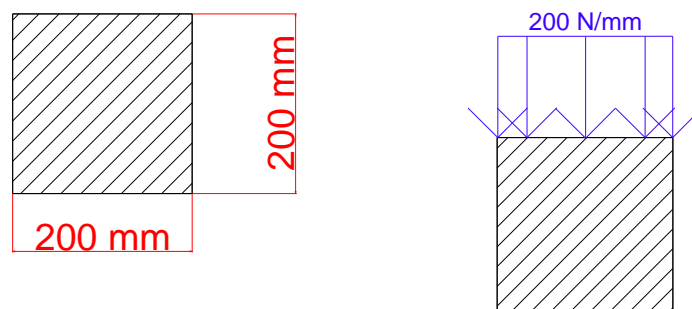


Ilustración 30: Sección transversal de la viga y carga aplicada.

5.4.1. Condiciones de Borde:

La carga aplicada es una carga puntual de 40 KN. A la hora de definir la carga puntual en este modelo se deberá tener la consideración que es un modelo en tres dimensiones por lo tanto la carga que se deberá aplicar es sobre una línea. Por lo tanto, pasará a ser una carga repartida sobre una línea, esta carga repartida se obtendrá a partir de la carga total aplicada de 40 KN dividido entre la longitud de la sección transversal de la viga de 200 mm, quedando la carga repartida a aplicar de 200 N/mm.

$$F_{aplicar} = \frac{40000N}{200\text{ mm}} = 200 \frac{N}{\text{mm}}$$

Condiciones de empotramiento, se aplica en la superficie de la viga tal como se muestra en la ilustración 31.

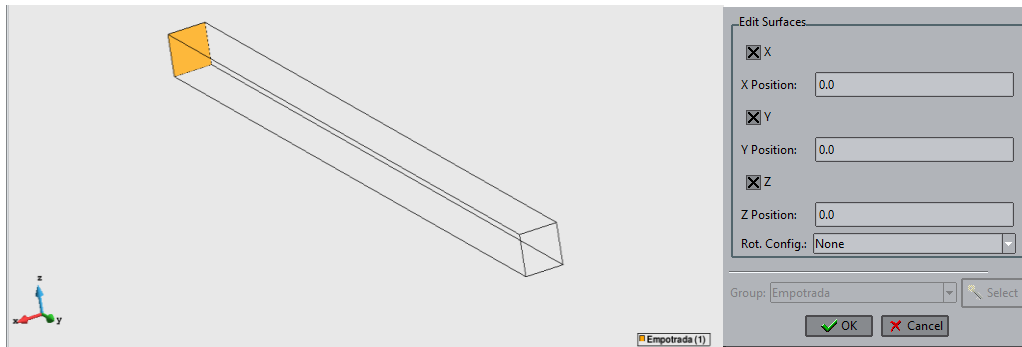


Ilustración 31: Superficie empotrada y direcciones bloqueadas.

5.4.2. Tipo de malla y resultado gráfico.

El tipo de mallado que se generará en este modelo será de tipo estructurado, con elemento de tipo hexaedro y por último se irá alternando entre elementos lineales o cuadráticos. Este mallado se realizarán para distinta n, donde las n son las divisiones que realizarán al modelo.

En las siguientes imágenes se mostrará una comparación, de los cálculos obtenido por el programa utilizando diferente los dos tipos cuadrático que hay.

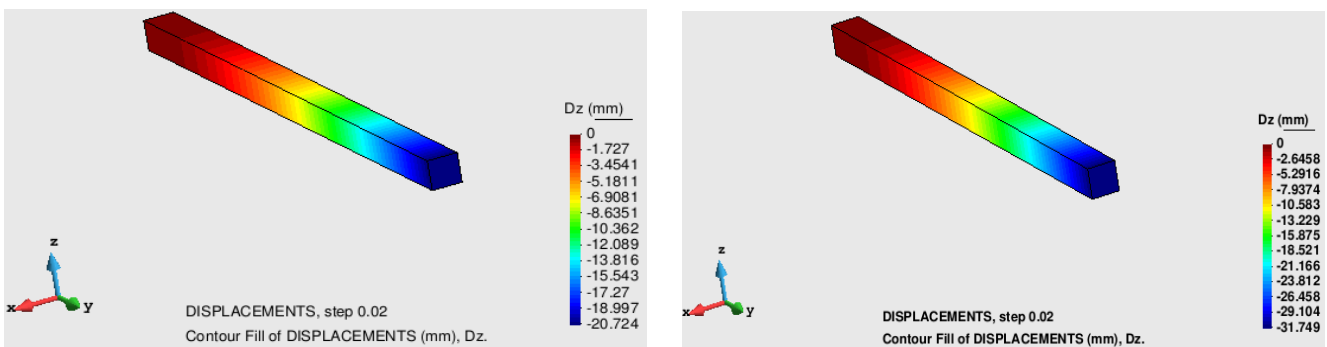


Ilustración 32: Deformación en Dz para elementos lineales y cuadráticos, n=1.

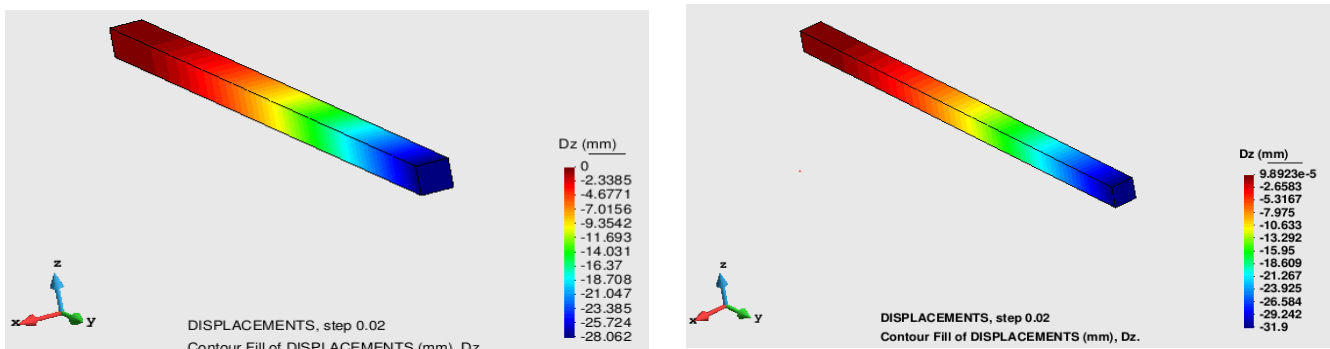


Ilustración 33: Deformación en Dz para elementos lineales y cuadráticos, n=2.

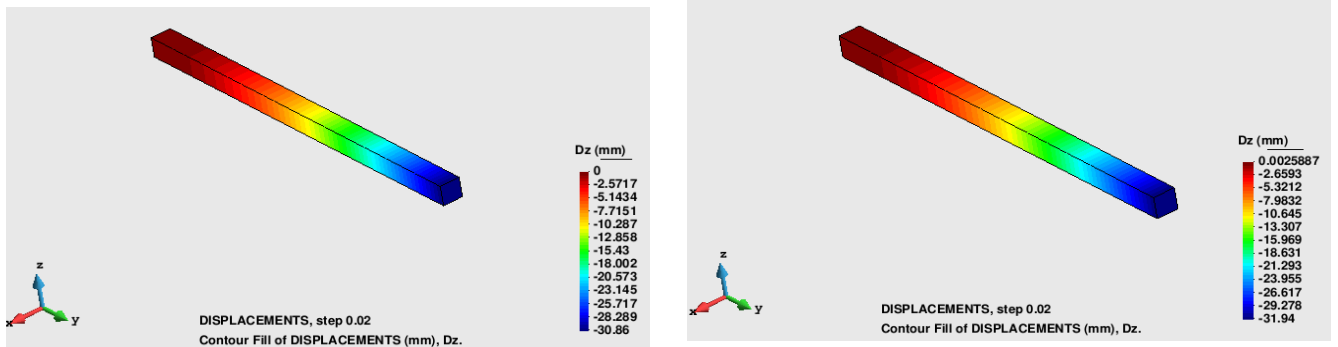


Ilustración 34: Deformación en Dz para elementos lineales y cuadráticos, $n=4$.

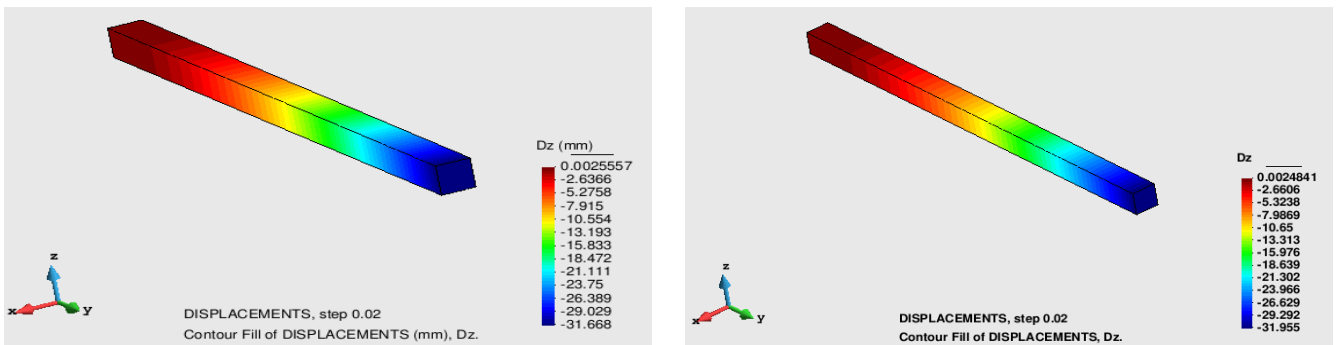


Ilustración 35: Deformación en Dz para elementos lineales y cuadráticos, $n=8$.

5.5. Modelo 2

La estructura del Modelo 2 está constituida por una viga de perfil rectangular macizo de $200 \times 200 \text{ mm}$ y una longitud de 4000 mm . Este modelo tendrá dos apoyos uno en cada extremo de la biga y uno de estos apoyos se le dará un grado de libertad en la dirección del eje (Y) para permitir el desplazamiento en esa dirección. La carga repartida será 10 N/mm .

El material que se usará en este modelo será el acero y se considerará que tendrá un comportamiento lineal.

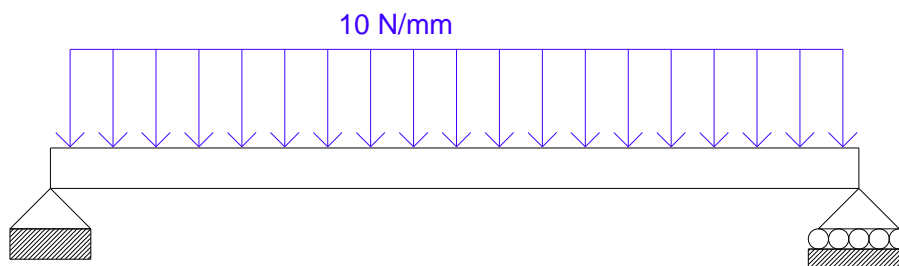


Ilustración 36: Estructura del modelo 2 y carga aplicada.

5.5.1. Condiciones de borde:

A la hora de aplicar la carga en el programa, se deberá tener en cuenta que la carga repartida será aplicada sobre una superficie y por lo tanto se tendrá que dividir la fuerza aplicada total de 40 *KN* entre la superficie que es de 800000 *mm*². Quedando la carga a aplicar en el modelo del *GID* de $0,05 \frac{N}{mm^2}$ y para los cálculos analíticos de $10 \frac{N}{mm}$.

Cálculo de la carga que se tendrá en cuenta a la hora de definir las condiciones de borde o realizar los cálculos analíticos.

$$S = 4000 \text{ mm} * 200 \text{ mm} = 800000 \text{ mm}^2$$

$$F_{\text{aplicar en GID}} = \frac{40\,000 \text{ N}}{800000 \text{ mm}^2} = 0,05 \frac{N}{mm^2}$$

$$F_{\text{aplicar en GID}} = 0,05 \frac{N}{mm^2} * 200 \text{ mm} = 10 \frac{N}{mm}$$

La definición del apoyo y la rótula (libre en la dirección *Y*) se aplicará sobre líneas. Por lo tanto, el apoyo fijo con cero grados de libertad se bloqueará todas las direcciones y el apoyo que se considera como una rótula, que tendrá un grado de libertad para permitir el desplazamiento de la viga en la dirección longitudinal de la viga, que en este modelo será el eje *Y*, quedando de la siguiente forma.

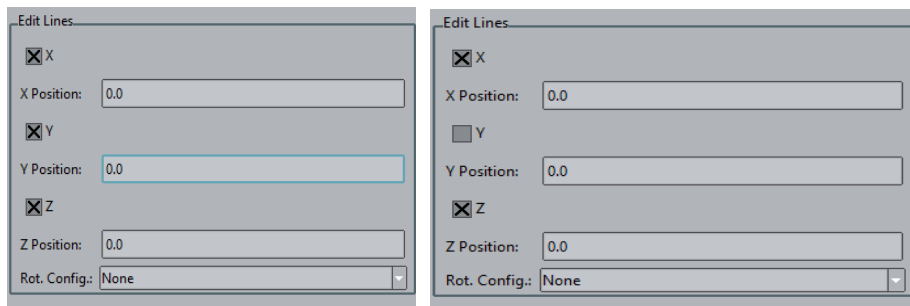


Ilustración 37: Izq. direcciones bloqueadas el apoyo fijo y drcha. direcciones bloqueadas en la rótula.



Ilustración 38: Líneas donde están definida la rótula y apoyo fijo.

5.5.2. Tipo de malla y resultado gráfico.

El tipo de malla que se generará en este modelo será de tipo estructurado, con elementos de tipo hexaedro y por último elementos lineales y cuadráticos. Este proceso se realizará para distintas n , y en este caso serán para n igual a 1, 2, 4 y 8. A continuación se mostrará los resultados obtenidos.

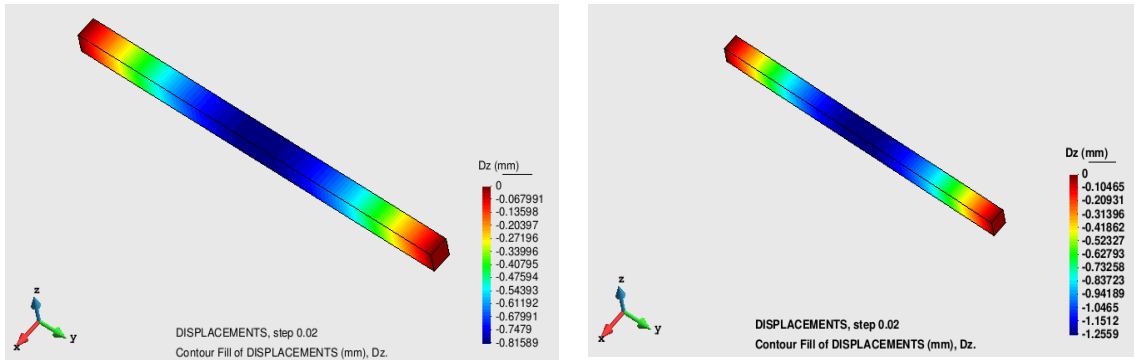


Ilustración 39: Deformación en Dz para elementos lineales y cuadráticos, $n=1$.

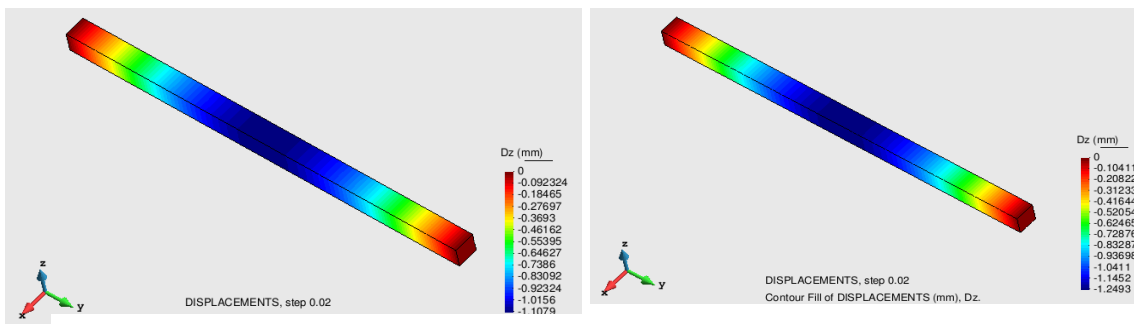


Ilustración 40: Deformación en Dz para elementos lineales y cuadráticos, $n=2$.

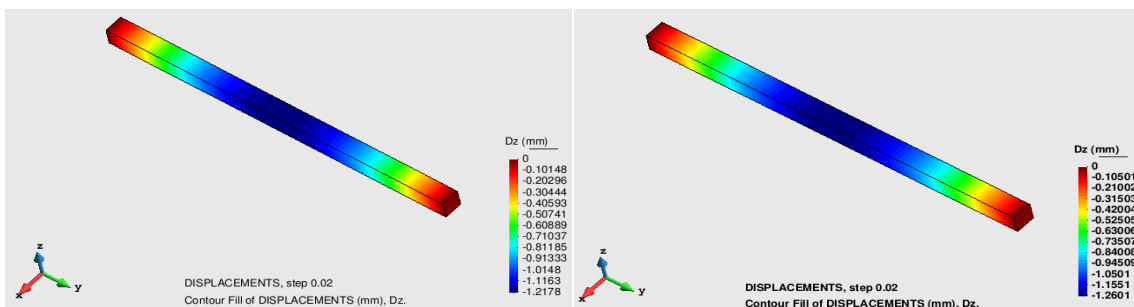


Ilustración 41: Deformación en Dz para elementos lineales y cuadráticos, $n=4$.

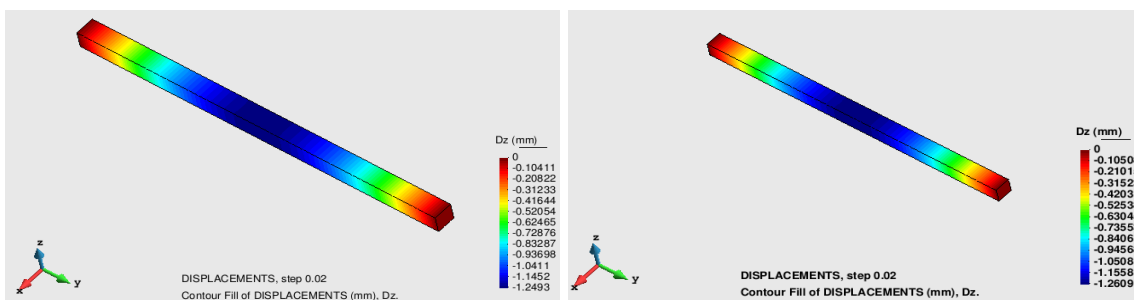


Ilustración 42: Deformación en Dz para elementos lineales y cuadráticos, $n=8$.

5.6. Modelo 3

La estructura de este Modelo tendrá las mismas condiciones de borde del modelo 2, con la diferencia que el material asignado será un compuesto de epoxi y fibra de carbono, donde la composición será la siguiente un 60% de fibra de carbono y 40% de epoxi.

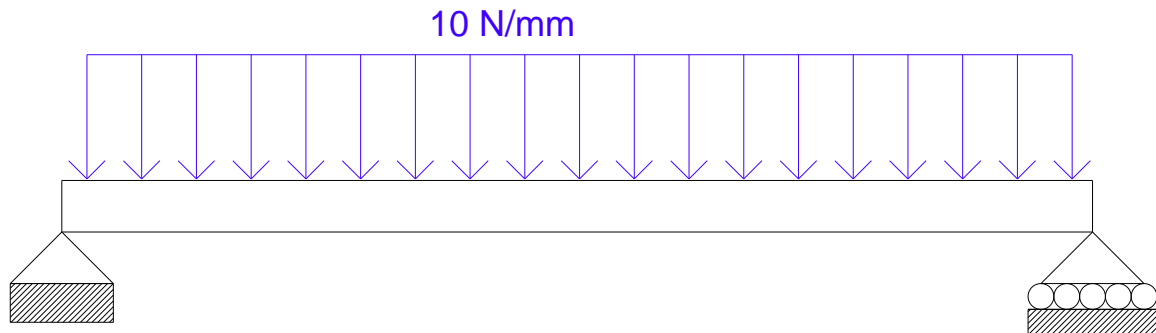


Ilustración 43: Modelo 3 y carga aplicada.

5.6.1. Condiciones de borde

Las condiciones de borde son las mismas que el modelo el modelo 2, pero con una variación que se deberá orientar bien la dirección de la fibra. Para ello se hará una rotación de 90° en el eje Z por el motivo que la pieza está orientada en el eje Y y las fibras se han orientado transversalmente a ese eje.

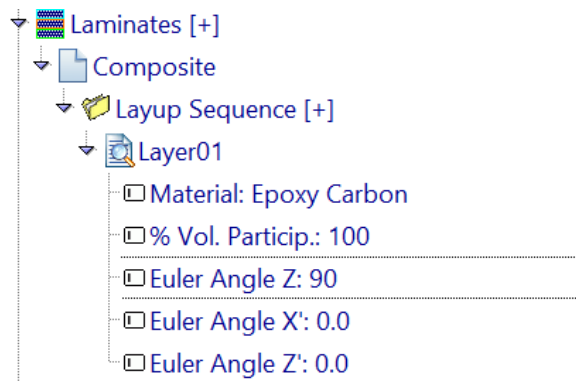


Ilustración 44: Rotación de 90° eje Z.

5.6.2. Tipo de malla y resultado gráfico.

El tipo de mallado que se realiza en este modelo es de tipo estructurada y los elementos son hexaédricos. En las siguientes imágenes se hará una comparación de la deformación conseguida con elementos lineales y cuadráticos para diferentes n .

Comportamiento de las formulaciones utilizadas

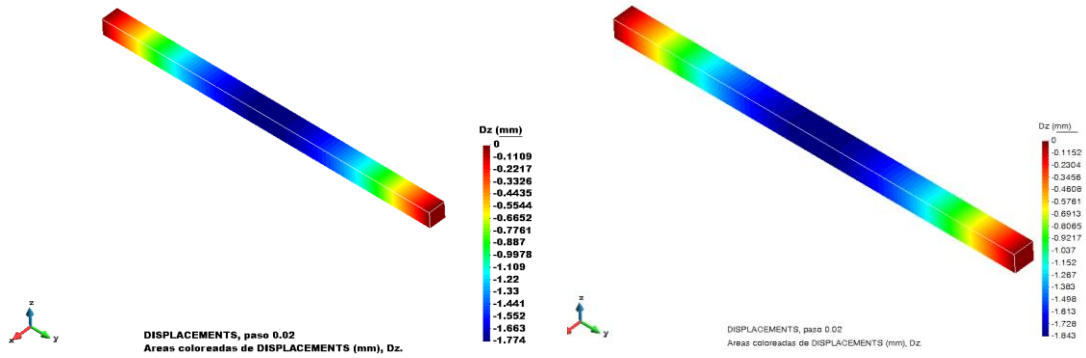


Ilustración 45: Deformación en Dz para elementos lineales y cuadráticos, $n=1$

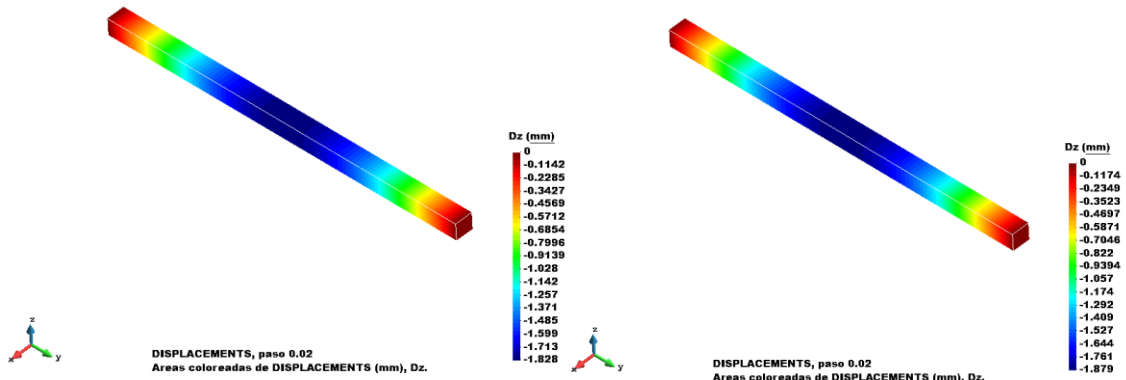


Ilustración 46: Deformación en Dz para elementos lineales y cuadráticos, $n=2$.

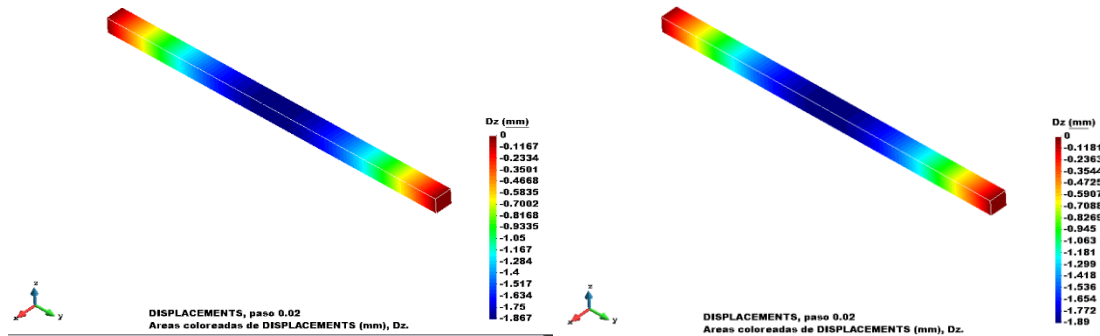


Ilustración 47: Deformación en Dz para elementos lineales y cuadráticos, $n=4$

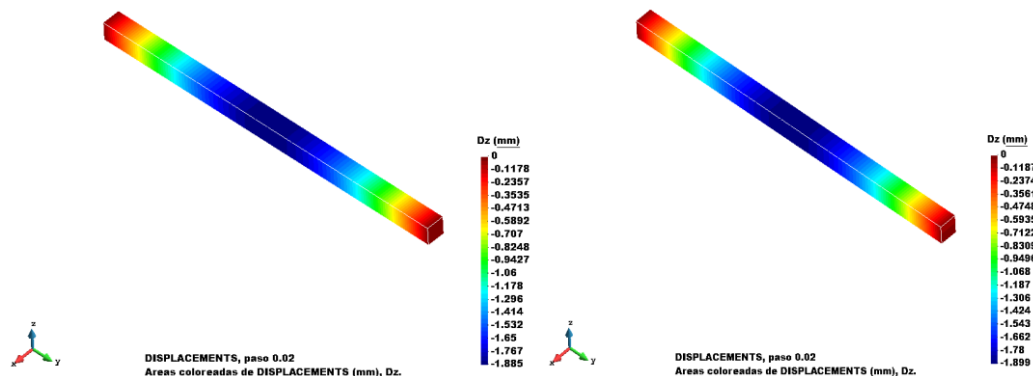


Ilustración 48: Deformación en Dz para elementos lineales y cuadráticos, $n=8$.

5.7. Cálculo analítico de los modelos 1, 2 y 3

En este apartado se realizarán los cálculos analíticos de los modelos 1, 2 y 3 para poder compararlos con los datos recogidos del programa GID. Las fórmulas para realizar los cálculos se han extraído del prontuario de perfiles metálicos.

Como los tres modelos tienen una sección rectangular maciza, se calculará la inercia a continuación para el uso en los cálculos posteriores.

$$I_T = \frac{a * b^3}{12} = \frac{200 * 200^3}{12} = 133333333.3 \text{ mm}^4$$

5.7.1. Cálculo analítico del modelo 1.

Calculado con el prontuario

- Angulo de giro:

$$\varphi_A = \frac{p * l^2}{2 * E * I} = \frac{40.000 \text{ N} * (4000 \text{ mm})^2}{2 * 200000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} * 133333333.3 \text{ mm}^4} = 0.012 \text{ rad}$$

- Ecuación de la elástica

$$Y = \frac{p * l^3}{3 * E * I} = \frac{40000 \text{ N} * (4000 \text{ mm})^3}{3 * 200.000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} * 133333333.3 \text{ mm}^4} = 32 \text{ mm}$$

5.7.2. Cálculo analítico del modelo 2.

Calculado con el prontuario

- Angulo de giro:

$$\varphi_A = \frac{q * l^3}{24 * E * I} = \frac{10 \frac{\text{N}}{\text{mm}} * (4000 \text{ mm})^3}{24 * 200000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} * 133333333.3 \text{ mm}^4} = 0,020 \text{ rad}$$

- Ecuación de la elástica

$$Y = \frac{5 * q * l^4}{384 * E * I} = \frac{5 * 10 \text{ N/mm} * (4000 \text{ mm})^4}{384 * 200000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} * 133333333.3 \text{ mm}^4} = 1,25 \text{ mm}$$

5.7.3. Cálculo analítico de la viga Modelo 3.

Cálculo de módulo de Young del compuesto se aplica la fórmula [4.9] de la teoría serie-paralelo.

$$E_c = k_f * E_f + k_m * E_m = 0,6 * 242000 \frac{N}{mm^2} + 0,4 * 4670 = 147068 \frac{N}{mm^2}$$

$$Y = \frac{5 * q * l^4}{384 * E_c * I} = \frac{5 * 10 \text{ N/mm} * (4000 \text{ mm})^4}{384 * 147068 \frac{N}{mm^2} * 133333333,3 \text{ mm}^4} = 1,70 \text{ mm}$$

5.7.4. Resumen de los datos recopilados de los tres primeros modelos.

En la siguiente tabla se mostrarán la cantidad de nodos y elementos, que tendrán los modelos para diferentes n que se ha tenido en cuenta.

n	DIVISIONES LONGITUDINALES	# elementos	ELEMENTOS LINEALES	ELEMENTOS CUADRÁTICOS
			# nodos	# nodos
1	20	20	84	248
2	40	160	369	1221
4	80	1280	2025	7265
8	160	10240	13041	49185

Tabla 15: Resumen del número de elemento de cada modelo.

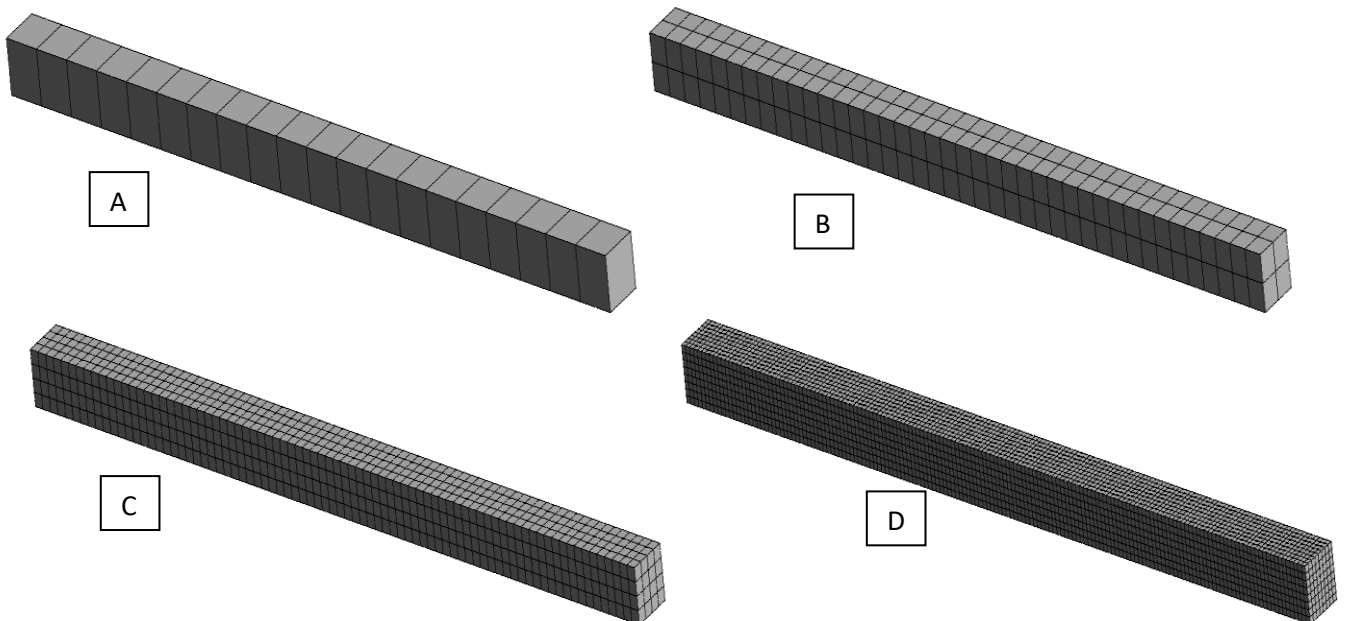


Ilustración 49: Mallas consideradas (A) n=1; (B) n=2; (C) n=4; (D) n=8.

n	DEFORMACION Dz (mm)					
	error relativo (%)					
	Orden integración lineal			Orden integración cuadrática		
	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 1	CASO 2	CASO 3
1	20,7 35,2%	0,8 34,7%	1,8 4,4%	31,7 0,8%	1,3 0,4%	1,8 8,4%
2	28,1 12,3%	1,1 11,4%	1,8 7,5%	31,9 0,3%	1,3 0,7%	1,9 10,5%
4	30,9 3,6%	1,2 2,6%	1,9 9,8%	31,9 0,2%	1,3 0,8%	1,9 11,2%
8	31,7 1,0%	1,2 0,1%	1,9 10,9%	32,0 0,1%	1,3 0,9%	1,9 11,7%
Resultado de la deformación analítico.	32,0	1,3	1,7	32,0	1,3	1,7

Tabla 16: Deformaciones y error relativo.

Para tener una idea de qué tipo de malla se necesitará generar y que tan precisa deberá ser, se calculará el error de desplazamiento entre las deformaciones obtenidas con el programa y los cálculos analíticos conseguido mediante fórmulas. Esto se realiza por el motivo que hay que ir con precaución a la hora de generar la malla porque a más finas sea la malla se generan más elementos, con ellos aumentaría el tiempo de cálculo del programa y además se llega un momento que por más fina que sea la malla el resultado no varíe mucho como se observa en la tabla 16.

Además, la tabla 16 muestra también que en los casos 1 y 2 el error se va reduciendo a medida que aumenta el número de elementos, o si se utilizan elementos lineales en lugar de cuadráticos. Ahora bien, en el caso 3 el error aumenta si se refina la malla y que, en el caso que debería obtenerse mejor resultado (elemento cuadrático y malla más fina), este es superior al 11%. Esto es debido a que la formulación analítica considera un comportamiento en todas las direcciones del compuesto, mientras que el modelo de elementos finitos está considerando una formulación en serie/paralelo, que proporciona un comportamiento a cortante del material mucho menos rígido que la formulación en paralelo. A medida que se refina la malla, y al utilizar elementos cuadráticos, el efecto del cortante se acentúa y proporciona la divergencia observada en los resultados.

Como se puede apreciar que con una n igual a cuatro se podría trabajar sin ningún problema.

5.8. Modelo 4

A partir de este subapartado se comenzará a trabajar con opciones más avanzada del programa y se varia la forma de obtener los resultados, para más información véase el anexo C.

Este modelo se trata de una viga de perfil rectangular maciza de $200 \times 200 \text{ mm}$ y una longitud de 4000 mm . En este caso particular se aplicará un desplazamiento determinado para conseguir realizar el diagrama de fuerza versus desplazamiento.

El material que se utilizará en este modelo es el acero, pero en este caso se utilizará un modelo no lineal para caracterizar su comportamiento.

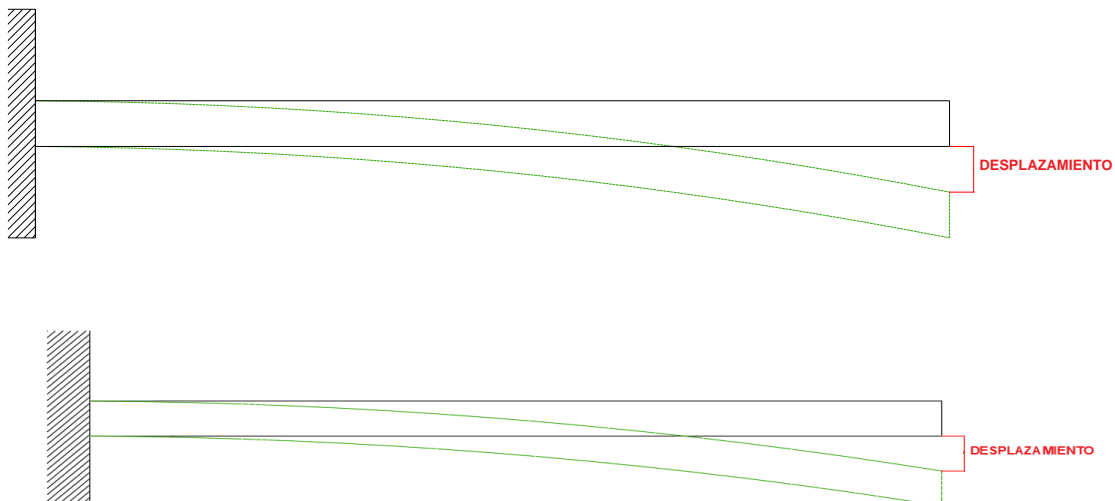


Tabla 17: Modelo 4.

5.8.1. Modelo no lineal

Las condiciones del modelo no lineal que se aplicaran a este modelo son las siguientes:

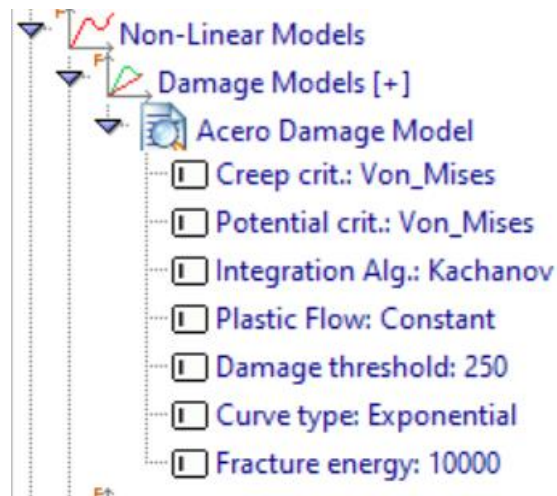


Ilustración 50: Condiciones del modelo 4, no lineal.

Como se puede observar en la ilustración 50 la energía de fractura es de 10000 mJ/mm², esta energía de fractura es muy elevada por lo tanto el comportamiento del material será semejante a la denominada "plasticidad perfecta" en la que el material ofrece una tensión constante, e infinita, una vez alcanzado el límite elástico. Pero no es el caso ya que en el modelo no-lineal no tiene el comportamiento lineal.

5.8.2. Condiciones de borde.

Las condiciones de borde que se aplicarán en este modelo serán dos, una de ella es la aplicación de desplazamiento en vez de una carga porque se busca la gráfica de máxima tensión y la otra condición será la fijación de una superficie.

El desplazamiento que se impondrá en este modelo será de unos 10 mm y será aplicado sobre una línea tal como se muestra en la ilustración 52. Este desplazamiento en alguno caso se irá modificando para obtener el diagrama fuerza (F) versus desplazamiento (D) pero se irá aumentando en la opción de *STAGES* donde hay una opción donde podemos definir el aumento de carga en cada paso véase ilustración 52.

Comportamiento de las formulaciones utilizadas

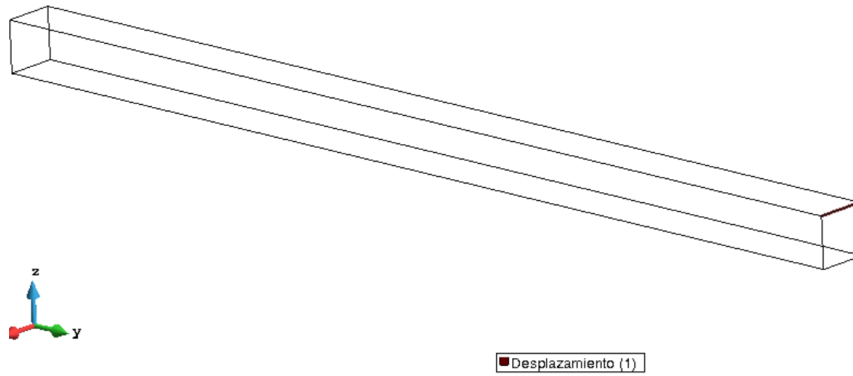


Ilustración 51: Donde se aplica el desplazamiento.

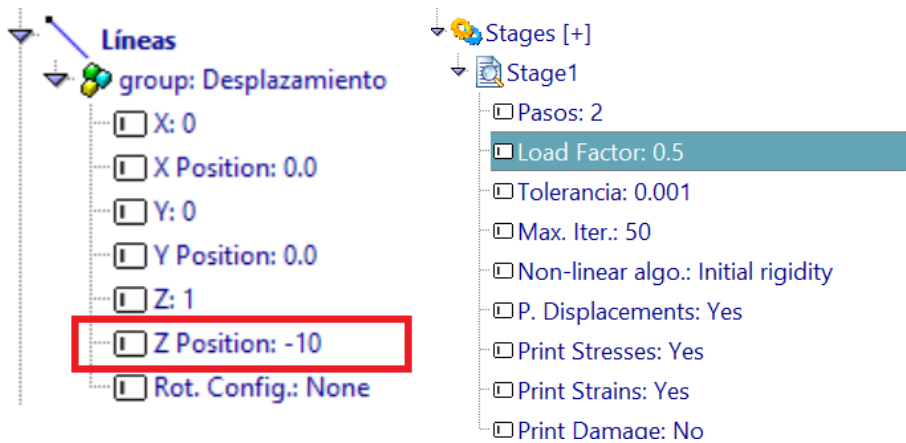


Ilustración 52: Derecha valor del desplazamiento aplicado e izquierda pasos de cálculos.

La condición de empotramiento se aplica en la superficie de la viga y se bloquearan todas las direcciones tal como se muestra en la siguiente ilustración.

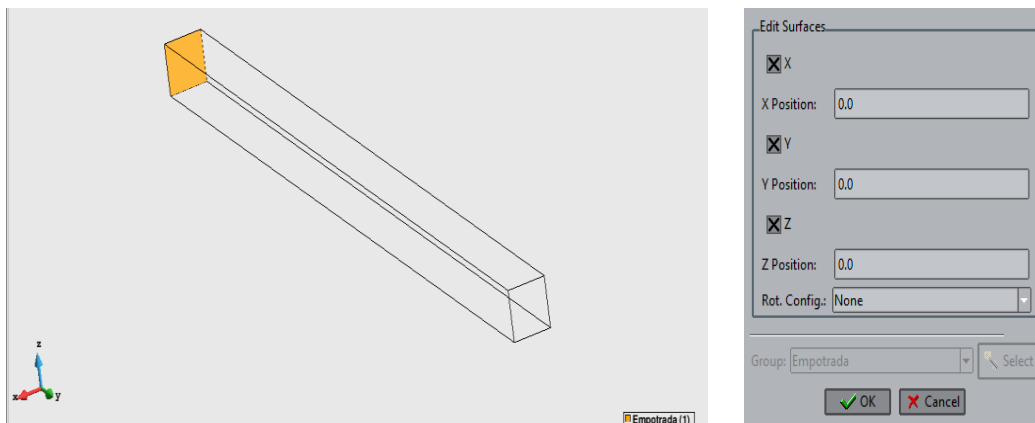


Ilustración 53: Superficie empotrada y direcciones fijadas.

5.8.3. Tipo de malla y resultado

El tipo de malla que se generará en este modelo será de tipo estructurada, con elemento de tipo hexaedro y por último el orden de integración de los elementos es cuadrático. Este proceso se realizará para n igual a 8.

5.8.4. Resultados.

El resultado que se desea mostrar en este modelo es el daño producido en la viga y donde hay más posibilidades que rompa la viga es donde esta empotrada. Tal como se puede observar en la siguiente ilustración 54 del DEGMA.

Además, podemos observar donde se produce las mayores tensiones que es en la zona más cercana al empotramiento. Se podría aliviar estas tensiones dándole unas condiciones de borde específicas, pero no se realizará en este modelo porque se realizarán en el modelo 5 que es un modelo de calibración.

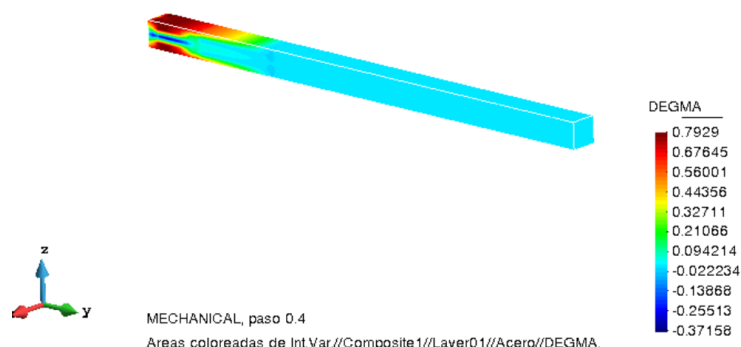


Ilustración 54: DEGMA del modelo 4.

Otra observación que se ha de tener en cuenta es la gráfica fuerza versus desplazamiento. Donde se puede apreciar que este modelo de daño generado tiene una energía de fractura elevada porque se asume que el acero tiene una gran capacidad de deformación y usa un modelo que permite esta deformación "infinita". Estos se usan porque son más estables que los que acaban rompiendo y permiten saber cómo evolucionan las deformaciones plásticas en la estructura.

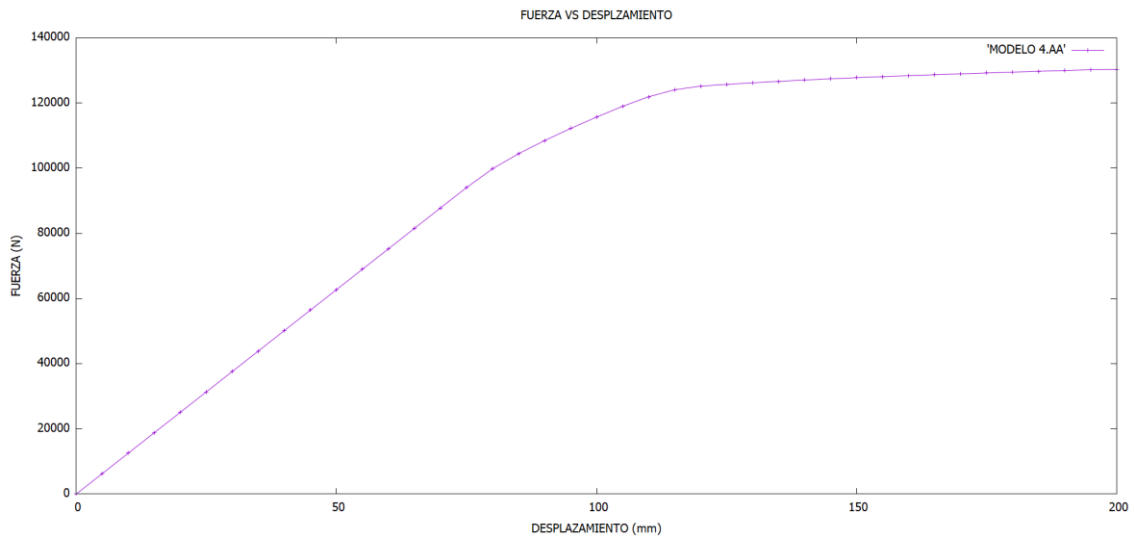


Ilustración 55: Fuerza vs desplazamiento modelo 4.

5.9. Modelo 5: Modelo de calibración materiales compuesto.

El modelo 5 será considerado un micro modelo que se usará para calibrar el material que se utilizara en este proyecto. Este micro modelo tiene las siguientes cotas 10x10x10 mm y estará conformador por una malla de un solo elemento de tipo hexaedro y cuadrático.

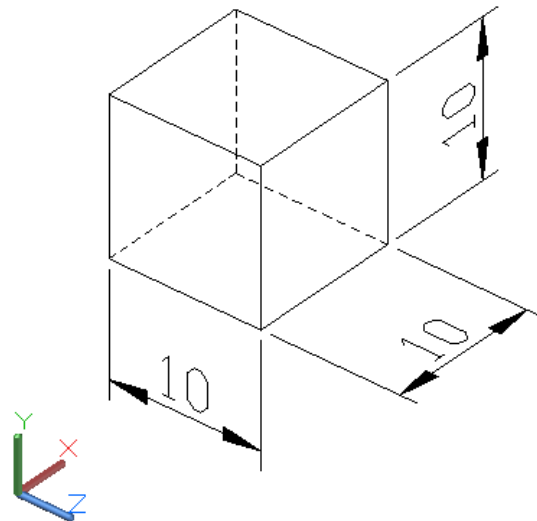


Ilustración 56: Cotas del micro modelo en mm.

Este modelo es un material compuesto formado por 60% de fibra de carbono y 40% de viniléster como se puede observar en la ilustración 57, pero con la característica que tendrá un comportamiento NO-lineal. Para dar el comportamiento no lineal del material se deberá seleccionar la opción siguiente “*Non linear Behaviour: Damage model*” que

se encuentra en las características de cada material y también se deberá generar un modelo no lineal.

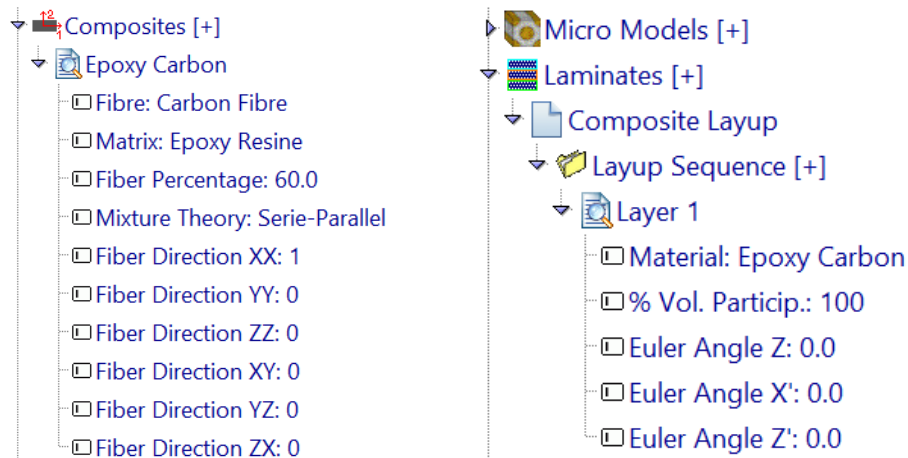


Ilustración 57: Composite del modelo 5.

Otra consideración para tener en cuenta en este modelo es que servía para comprobar el comportamiento de una forma rápida de los materiales “simples” o compuesto que se usarán en este proyecto. También se podrá mostrar el comportamiento del material cuando se daña mediante la curva de fuerza-desplazamiento y con esta curva tendremos una idea de cómo se comporta el material.

A continuación, se mostrarán los dos casos que se han realizado para calibrar el material. El caso 1 se definieron unas condiciones muy rígidas que impide el desplazamiento en cualquier dirección en una de las caras del modelo, en las que los efectos de Poisson enmascaraban los resultados buscados ya que se generaba estados de tensiones triaxiales. El caso 2 se definieron las condiciones adecuada para aliviar las tensiones en cierto puntos llamados puntos de Gauss-Legendre y también debido al efecto de Poisson. Ya que el efecto de Poisson es la relación que hay entre la deformaciones longitudinales en el sentido perpendicular a la fuerza aplicada y la deformaciones longitudinales en el sentido de la fuerza aplicada.

5.9.1. Condiciones de borde caso 1

Las condiciones de borde son las siguientes, en una de la superficie del plano YZ estarán fijas todas las direcciones (XYZ) y la superficie opuesta se le aplicará un desplazamiento en la dirección X, como se muestra en la siguiente ilustración.

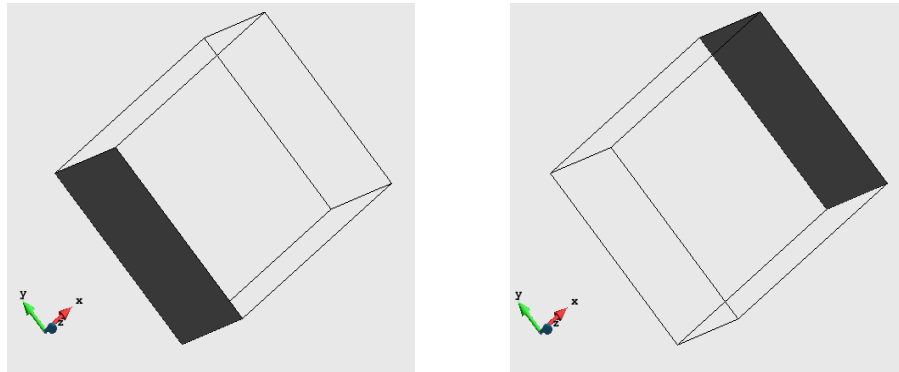


Ilustración 58: Condiciones de borde modelo 5 caso 1. Izquierda superficie fijas y derecha superficie donde se aplica el desplazamiento.

5.9.2. Condiciones de borde caso 2

En este segundo caso se impondrán algunas condiciones de borde más complejas para aliviar las acumulaciones de tensiones algunos de los puntos, para ello se tendrá que pensar la forma de hacerlo y no será fácil, porque cada condición será para provocar algún comportamiento en el micro modelo. En otras palabras, estas condiciones permitirán al modelo contraerse y dilatarse.

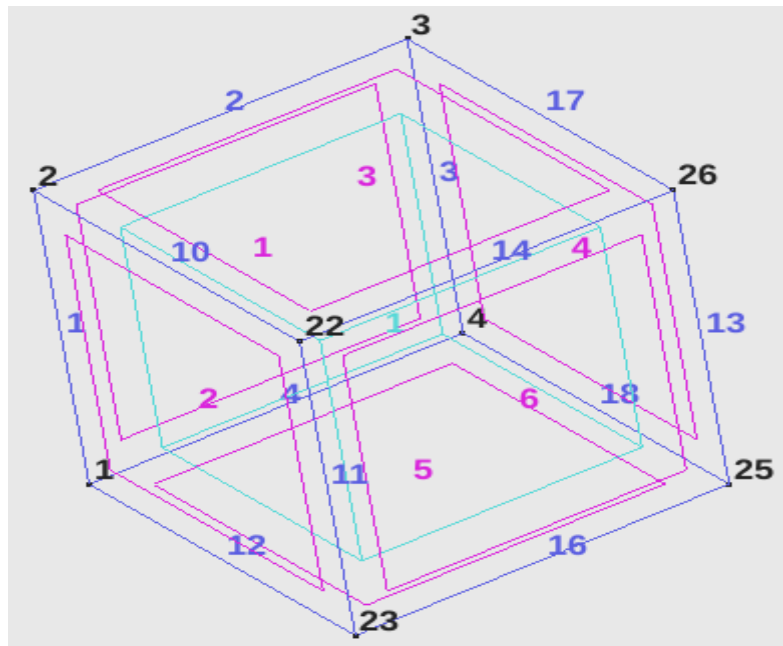


Ilustración 59: Condiciones de borde caso 2.

Para explicar las condiciones de borde que se aplicaran en el caso 2 se utilizará la ilustración 60, exactamente se aplicaran cinco condiciones de borde. Estas condiciones están aplicadas en nodos, superficies y líneas del modelo.

La primera condición que se impondrá es en el punto 23 que se fijara en todas las direcciones, esto se realiza para tener un punto fijo en nuestro modelo.

La segunda condición se aplicará serán en los puntos 2 y 22, estos puntos estarán fijo en la dirección X de tal forma que se consigue el desplazamiento de eso puntos en las direcciones Z e Y.

La tercera condición de borde se aplicar será en una línea, en este caso será en la línea 11 y se fijan las direcciones X y Z. Esto se hace para permitir el desplazamiento del modelo en la dirección Y de la tal forma que permita la compresión del modelo cuando se aplique la tracción.

La cuarta condición se aplicará en las líneas 12 y 10, se fijarán las direcciones X e Y. Esto permitirá la compresión del modelo es la dirección Z.

La quinta condición que se aplicara será en la superficie 2 y se fijara la dirección X. Esto no permitirá el desplazamiento del modelo en el plano ZY en la dirección X, pero si permitirá el desplazamiento en las otras direcciones.

Y, por último, las condiciones para el modelo de daño son las siguientes que se mostraran en la imagen siguiente.

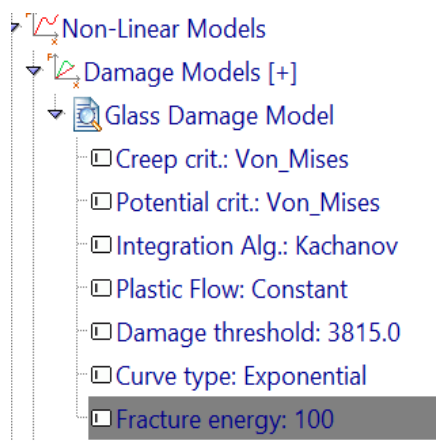


Tabla 18: Modelo de daño modelo 5.

5.9.3. Resultado y comparación del caso 1 y el caso 2.

Para ver las deformaciones en el caso 2 se realizarán unas comparativas mostrando ilustraciones de los casos. Las ilustraciones que se encuentre en la izquierda corresponden al caso 1 y las ilustraciones de la derecha corresponden al caso 2.

Comportamiento de las formulaciones utilizadas

Se comenzará con la dirección X porque tiene un comportamiento igual en los dos casos. Esto ocurre porque la superficie donde está el empotramiento tiene la misma condición de borde y es que están fija en la dirección X.

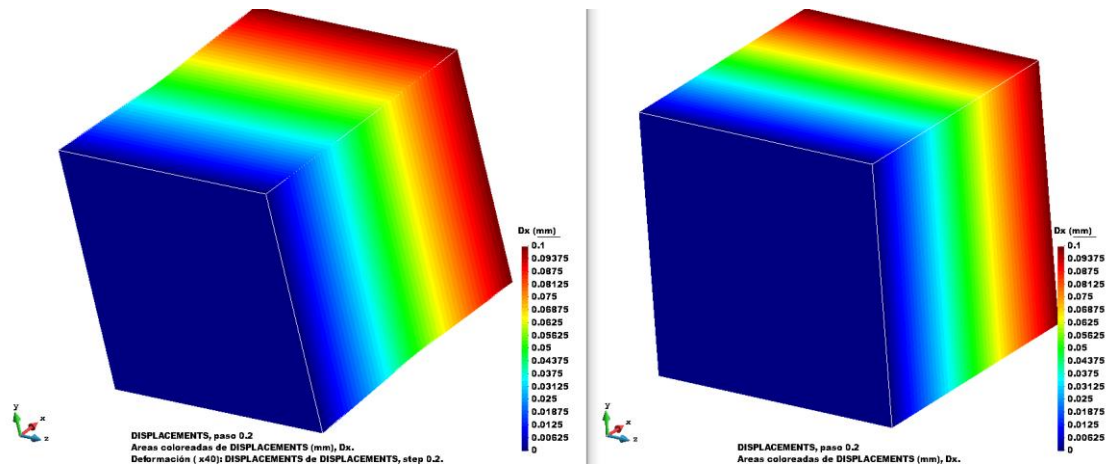


Ilustración 60: Desplazamiento en x.

En cambio, las deformaciones en la dirección Y, se puede observar que en el caso 1 no son homogéneas porque las condiciones de borde no se lo permiten porque son demasiadas rígidas y en cambio las deformaciones en el caso 2 son más homogénea por las condiciones de borde permite el deslizamiento del modelo en la dirección Y.

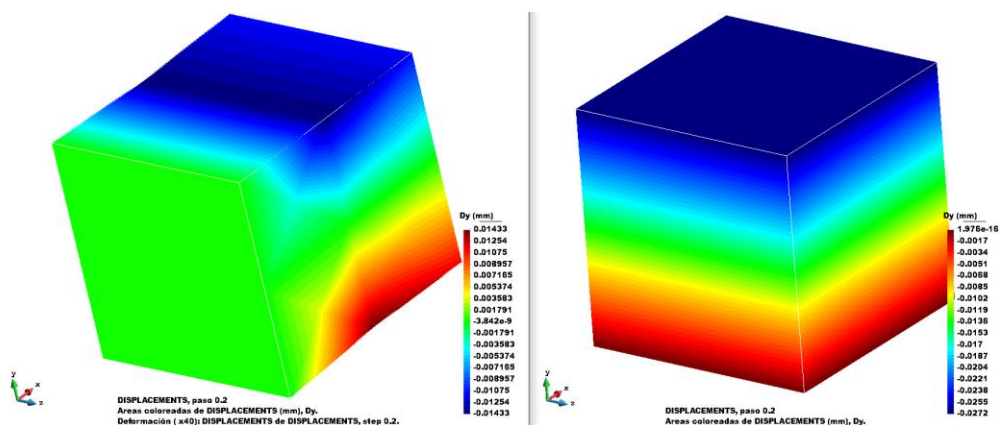


Ilustración 61: Desplazamiento en Y.

Y por último en la dirección Z, pasa lo mismo que en la dirección Y.

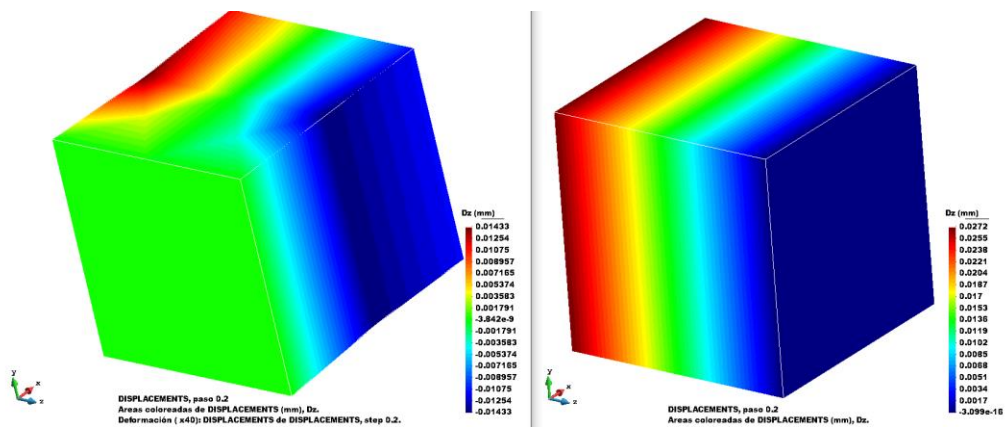


Ilustración 62: Desplazamiento en Z.

Por último, se puede observar en el caso 1 un estrechamiento a partir de una cierta distancia desde la superficie fijada y en cambio en el caso 2 no ocurre este estrechamiento.

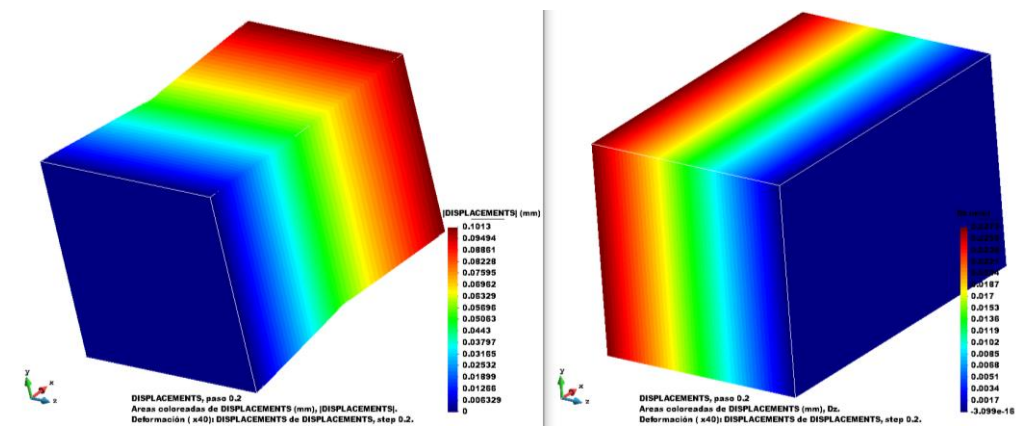


Ilustración 63: Deformación general.

En la siguiente ilustración se podrá observar que cuando se aplica la tracción en el modelo. En el caso 1 se contrae hacia el centro esto sucede porque donde se aplica el empotramiento esta fijo en todas las direcciones y en cambio en el caso 2 la contracción se produce hacia el punto 23 que esta fijo en todas las direcciones.

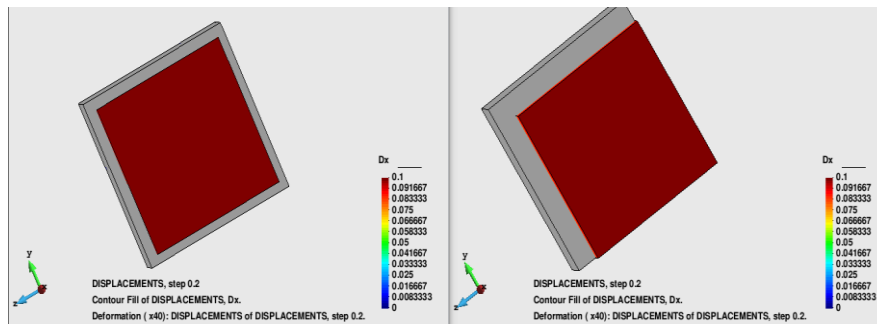


Ilustración 64: Deformación ocasionada por la tracción.

A continuación, se mostrará el comportamiento del modelo utilizando el caso 2, para ellos mostrará una gráfica de fuerza versus desplazamiento donde podrá observar que el material tiene poca energía de fractura tal como se ha definido, un valor de 100 mJ/mm².

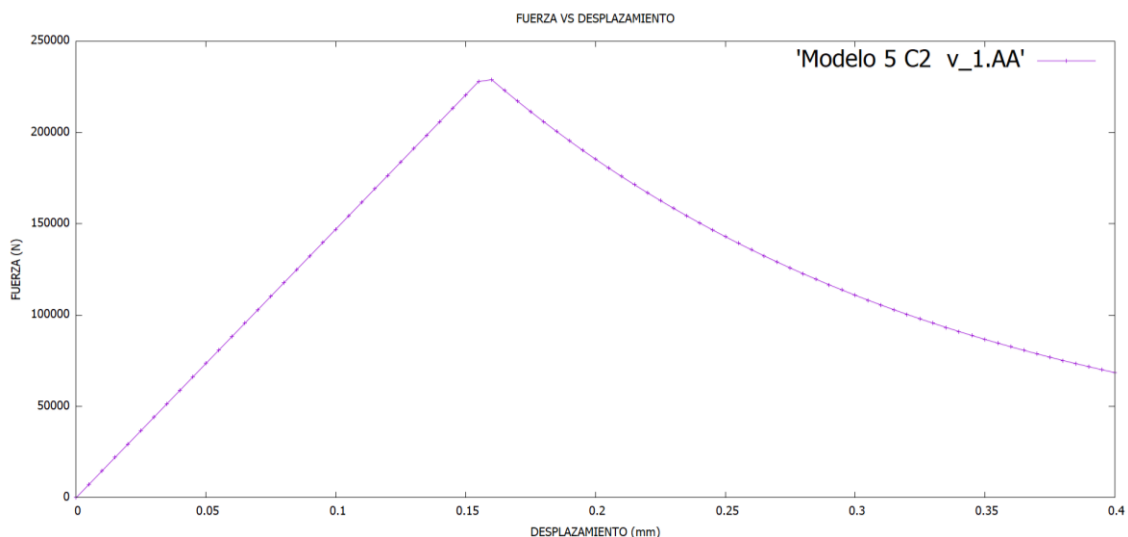


Ilustración 65: Gráfica de fuerza vs desplazamiento modelo 5 caso2.

El comportamiento obtenido del compuesto se mostrará a continuación donde podemos comprobar las condiciones B y C de la teoría de mezcla serie-paralelo. Para ellos se mostrarán las tensiones de compuesto, las tensiones de la fibra y las tensiones de la matriz, esto se hará en las direcciones X y Z o Y (aquí se elige una porque son iguales).

Estudio del caso 2 cuando la fibra está orientada en la dirección X y la cara se aplica en esa misma dirección.

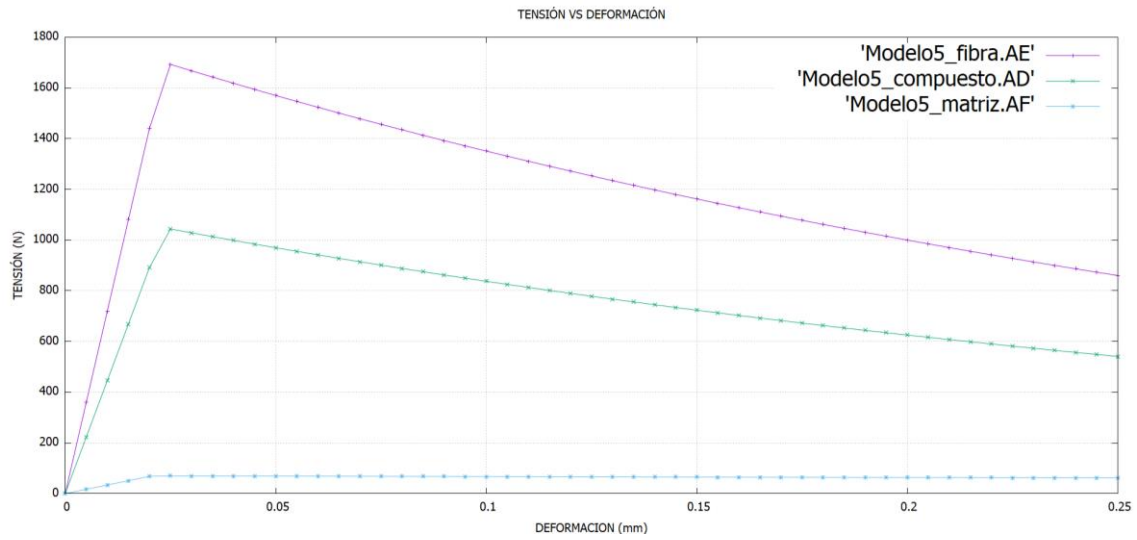


Ilustración 66: Condición de iso-deformación. Fibra, compuesto y fibra, respectivamente.

En esta grafica se puede observar que cumple la segunda condición de la teoría de mezcla serie paralelo, que el comportamiento de iso-deformación. Este comportamiento consiste en que tiene la misma deformación, pero con cargas diferentes.

6. ANÁLISIS DE UNA UNIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS.

En este apartado se hará la comparación entre el resultado experimental que se nos ha facilitado y los resultados analíticos obtenido mediante el programa PLCDs. Para ello se explicará cómo se procedió en el modelo experimental y luego se procesadora a explicar el modelo de cálculo. Cabe remarcar que en el modelo de cálculo se realizan dos estudios uno para pequeñas deformaciones y otro para grandes deformaciones (Véase el anexo E). En la teoría clásica para grandes deformaciones no se tratara en este trabajo.

6.1. Modelo experimental

En la prueba experimental que se ha realizado, consiste en una probeta de material LEO que es sometida a un esfuerzo de tracción mediante dos mordazas. La probeta es colocada entre las mordazas tal como se muestra en la siguiente ilustración y como se podrá observar al estar sujeta no permite la rotación de la probeta en ese eje. Además, la distancia de separación que hay entre las mordazas es de 75 mm.

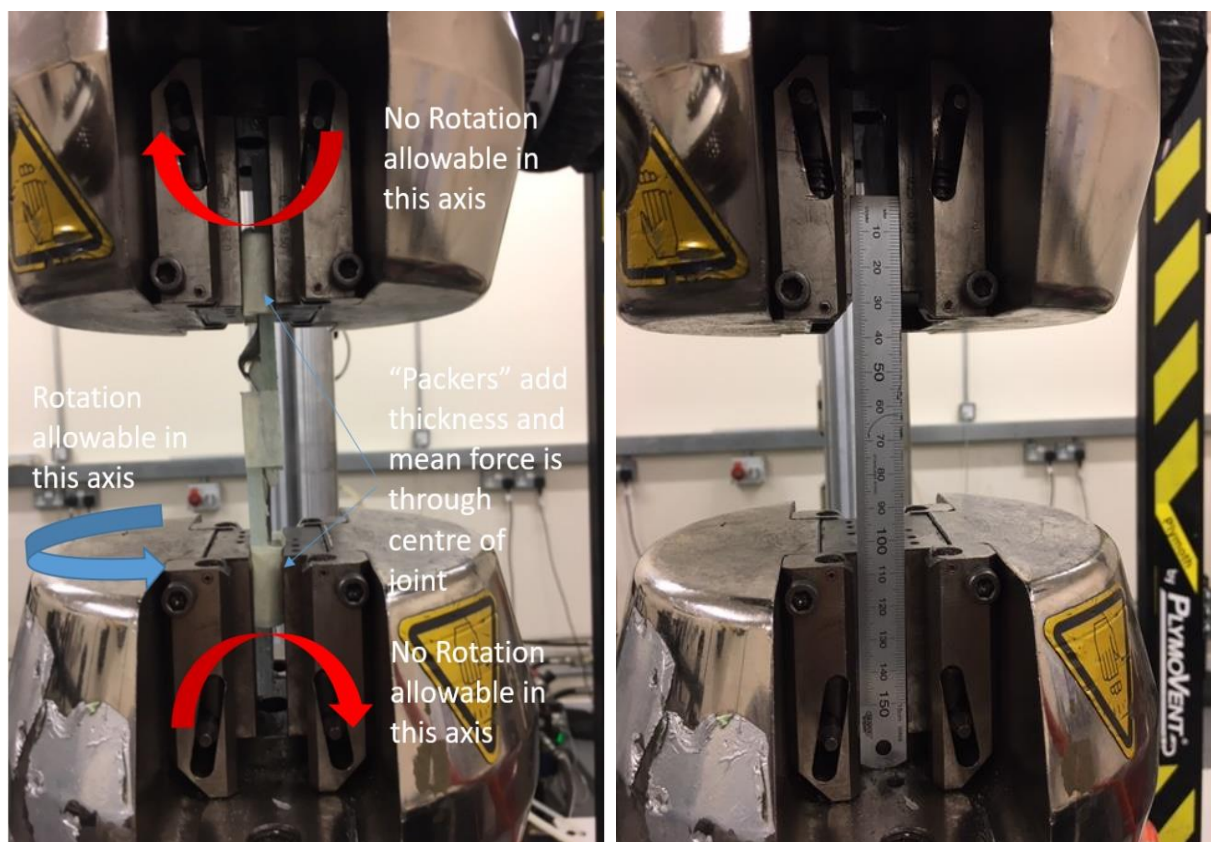


Ilustración 67: Prueba experimental.

En el momento que se realizará la prueba, la probeta experimentará excentricidad, para reducir esta excentricidad se añadirán un trozo de empaquetadura en cada extremo de la probeta y estará hecha del mismo material. Con esto se reduce la excentricidad.

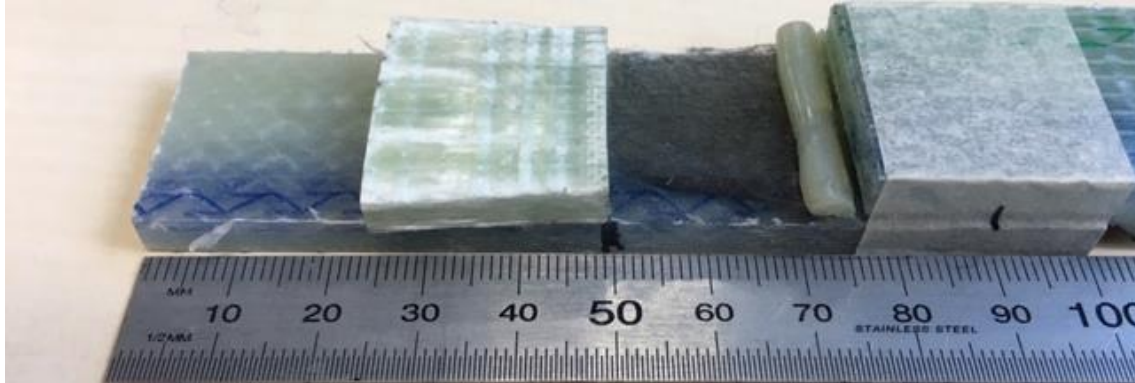


Ilustración 68: Empaquetadura añadida.

Se realizaron varias pruebas con distintas probetas, pero del mismo material y estos son los resultados obtenidos, y como se puede observar la discretización obtenida son muy semejante entre ellas.

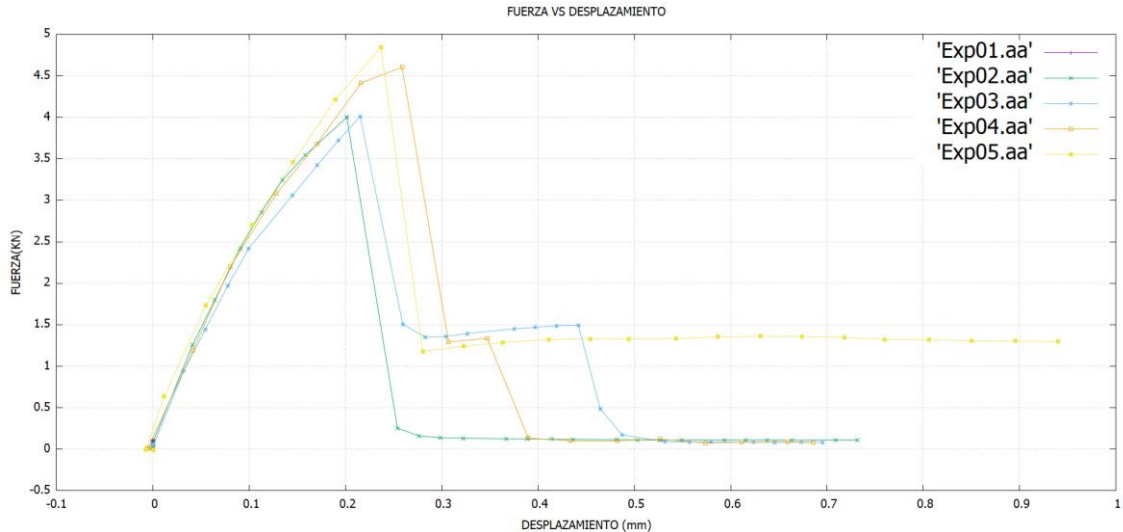


Ilustración 69: Resultados obtenidos de la prueba experimental.

Los desplazamientos se tomarán de los extremos de la probeta tal como se muestra en la siguiente ilustración. A partir de estos desplazamientos se obtendrá el desplazamiento relativo con lo que se podrá realizar la comparación con el modelo analítico.

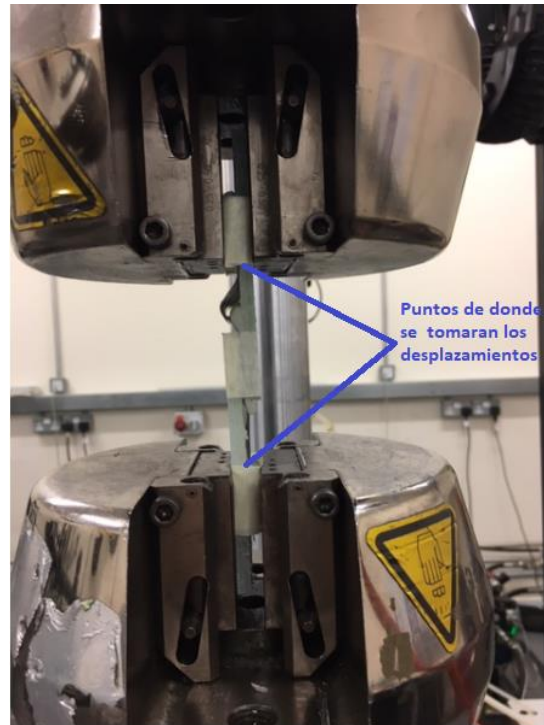


Ilustración 70: Puntos de donde se tomarán los desplazamientos.

6.2. Modelo de cálculo.

Este modelo será el último que se realizará en este proyecto, y estará compuesto por dos piezas largas de las siguientes dimensiones $57,70 \times 2,55 \times 25,4$ mm y una capa de adhesivo de las siguientes dimensiones $25,40 \times 0,50 \times 25,40$ mm. La capa de adhesivo servirá para unir las dos piezas de mayor dimensión y teniendo un solape entre ellas de unos $25,4$ mm. En los extremos tendrá trozos añadido de las siguientes medidas $5,00 \times 2,55 \times 25,40$ mm el motivo por lo que se añade esto se explicará más adelante.

El modelo efectivo que se tendrá en cuenta de esta probeta en el modelo de GID es de $75,00$ mm.

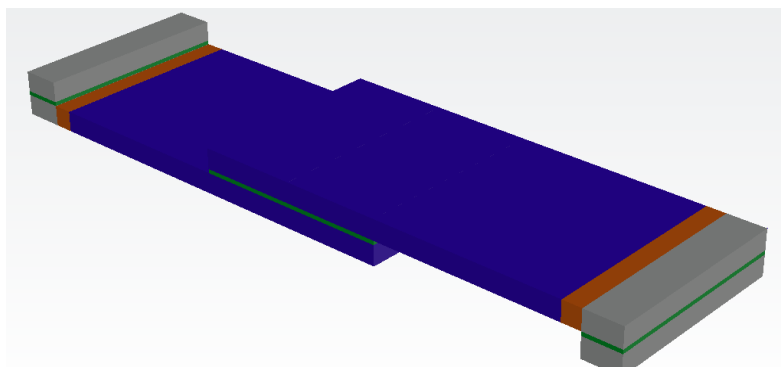


Ilustración 71: Modelo 7 en 3D

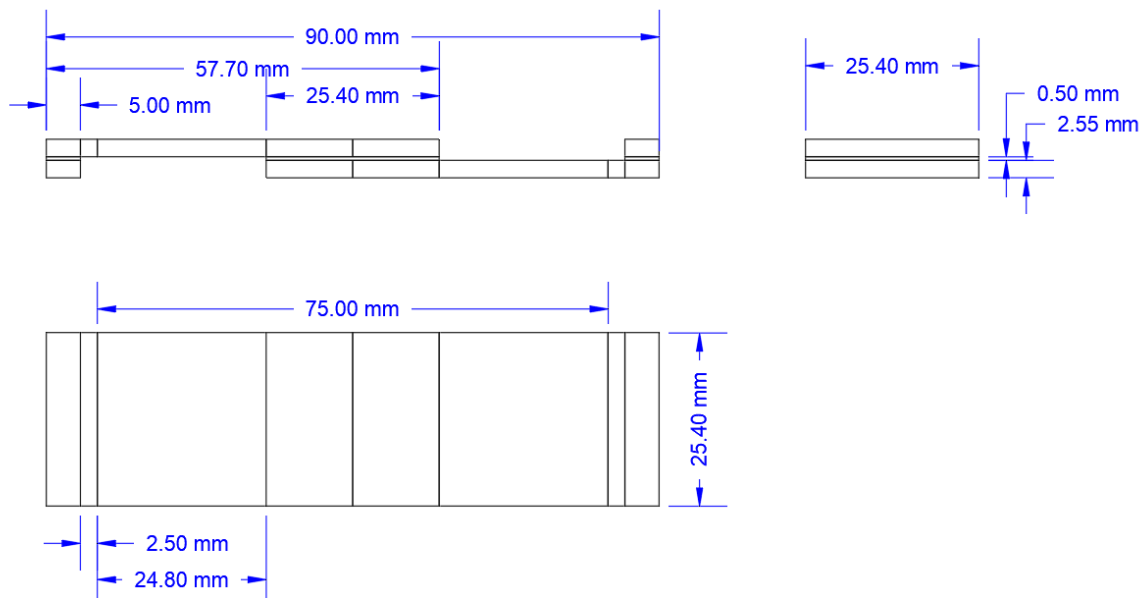


Ilustración 72: Vista de los perfiles y cotas del modelo 7.

A la hora de realizar el modelo en el GID se deberá tener varias consideraciones para simular el ensayo experimental y en especialmente para simular las pinzas.

Para la simulación de la pinza se dividirá el modelo en varias partes como se muestra en la ilustración 72. La parte del modelo de color gris corresponde a donde está sujeta la pinza para realizar la tracción en el modelo y la parte de color naranja es una zona que estará afectada por las tensiones provocadas por las pinzas.

La capa verde que une las dos piezas grises está puesta unir un trozo que se añadió, por lo tanto, esta capa de color verde sirve para mantenerlo unidos. En conjunto de esta unión véase la ilustración siguiente es una especie de empaquetadura para disminuir la excentricidad del modelo en el momento de realizar el experimento.

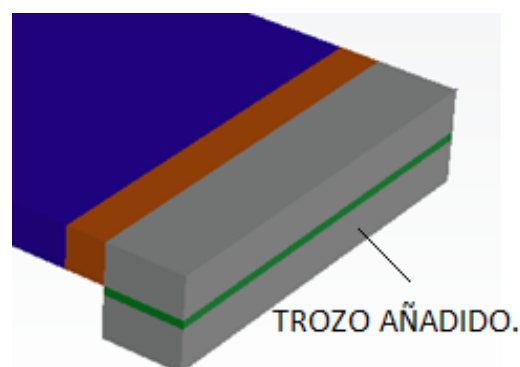


Ilustración 73: Trozo añadido en los extremos del modelo.

Como se explicó a principio de este apartado que iba a trabajar con dos modelos un con grandes deformaciones y otro con pequeñas deformaciones. Estos modelos son los siguientes que se muestran en la tabla.

NOMBRE	TEORIA	LAMINADO	ADHESIVO	GRANDES DEFORMACIONES
Connection_LD*	Serie/Paralelo	No Lineal	No-Lineal	Si
Connection_SD**	Serie/Paralelo	No Lineal	No Lineal	No
*LD, grandes deformaciones **SD, pequeñas deformaciones.				

Tabla 19: Características de los modelos grandes deformaciones y pequeñas deformaciones

6.3. Definir el material compuesto.

Antes de asignar el material compuesto al modelo, se tendrá que dar las características del compuesto. Para ello se tendrá que crear el compuesto, los parámetros son lo que se muestran en la ilustración siguiente, donde la A se seleccionaran los materiales simples que se utilizaran como matriz y fibra. En la B se pondrá el porcentaje de fibra que ocupara en el compuesto, en la C se selecciona la formulación que se utilizara en nuestro caso la formulación serie-paralelo y por último la C se definirán las direcciones de las fibras.

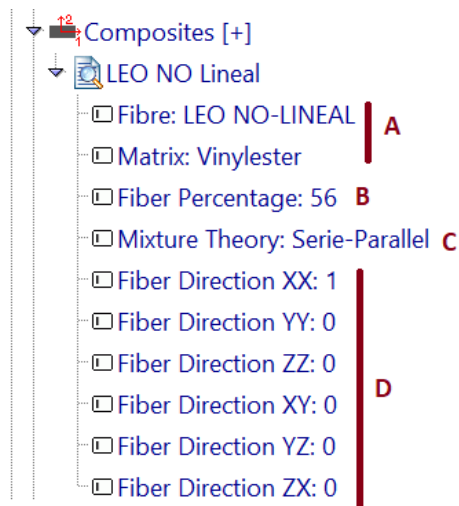


Ilustración 74: Características del compuesto No-Lineal.

También se deberá dar el comportamiento no lineal a los materiales simples que componen el compuesto. Las características de dichos materiales se tomarán los datos

que están en las tablas 12, 13 y 14 de este trabajo. Y por último el porcentaje de fibra será del 56% y del 44% de matriz.

6.4. Condiciones de borde.

Las condiciones de borde que se definirán en este modelo son las siguientes, la primera es fijar la superficie de un extremo en todas las direcciones como se muestra en la ilustración.

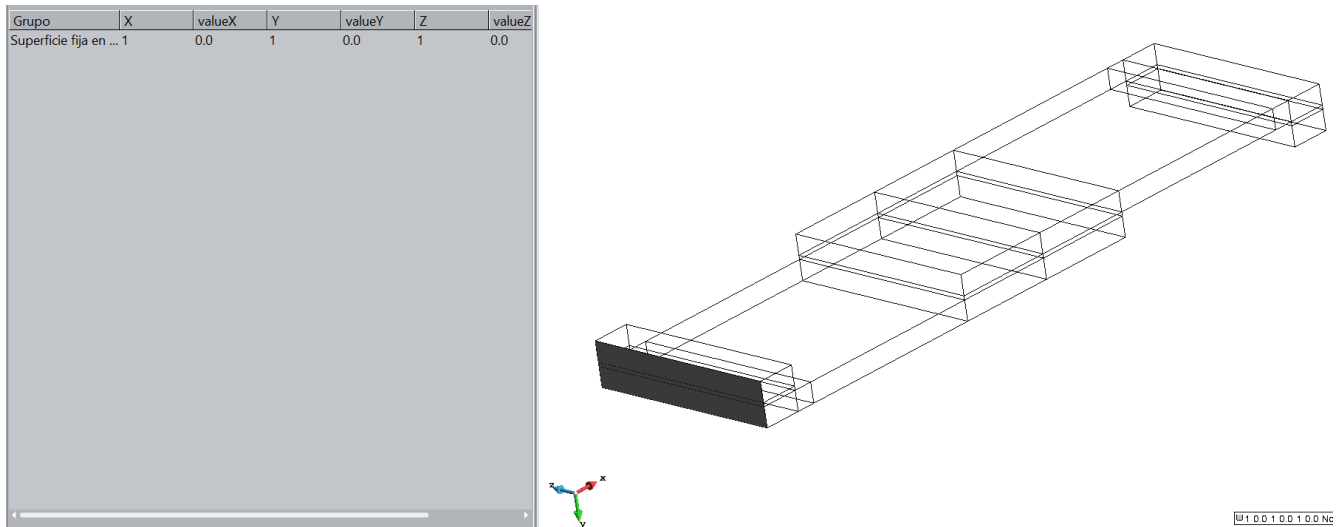


Ilustración 75: Condición de borde 1, superficie fija en todas las direcciones.

La segunda condición es coger el extremo opuesto y aplicar el desplazamiento.

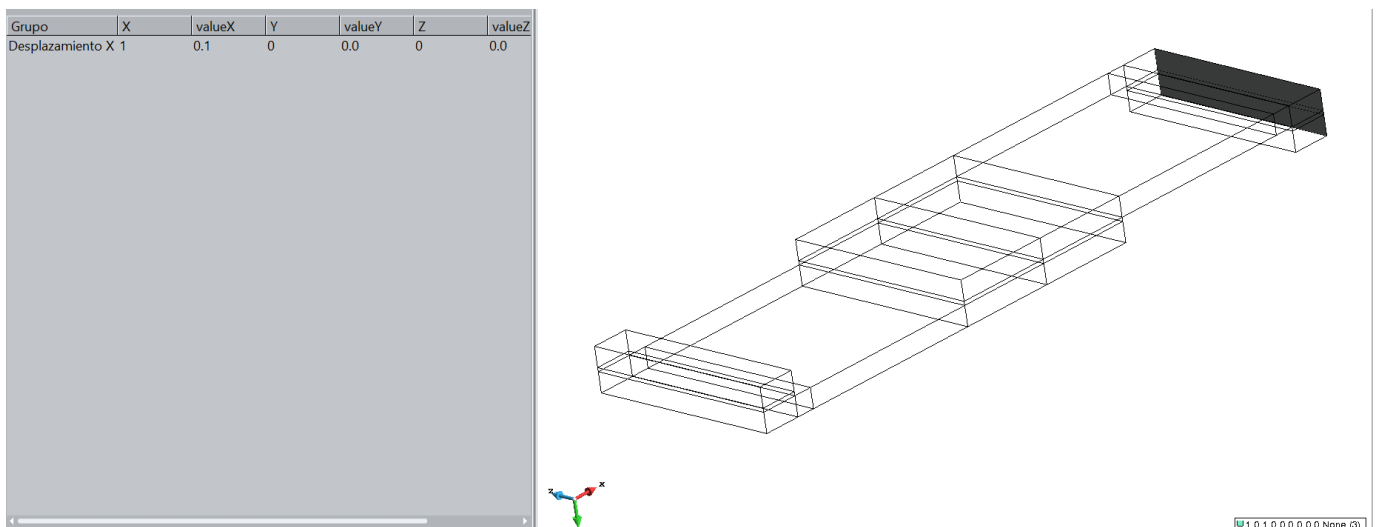


Ilustración 76: Superficie donde se aplicará el desplazamiento.

6.5.Resultados

Comparación de los modelos

Se procederá hacer una comparación de los resultados de grandes deformaciones, pequeñas deformaciones y los resultados experimentales. Como se puede observar en la siguiente ilustración el modelo de grandes deformaciones se asemeja más a los resultados experimentales que el de pequeñas deformaciones y además el modelo de grandes deformaciones es más rígido.

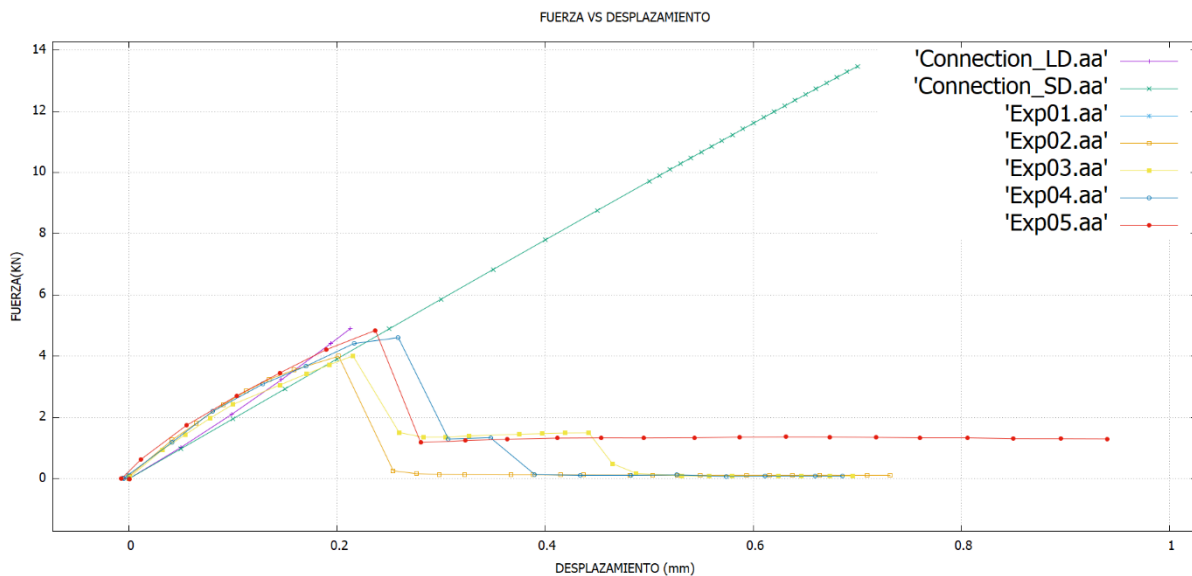


Ilustración 77; comparación de los resultados experimentales y el modelo numérico en grandes deformaciones (LD) y pequeñas deformaciones (SD).

A la hora de comparar las curvas de grandes y pequeñas deformaciones, se puede observar que la deformación de pequeñas deformaciones no es correcta porque la excentricidad genera un momento constante que la deformación de la estructura no puede corregir. El modelo es capaz de aguantar cargas mayores a las experimentales porque el estado de deformación que se genera no es el adecuado, lo que falsea los resultados.

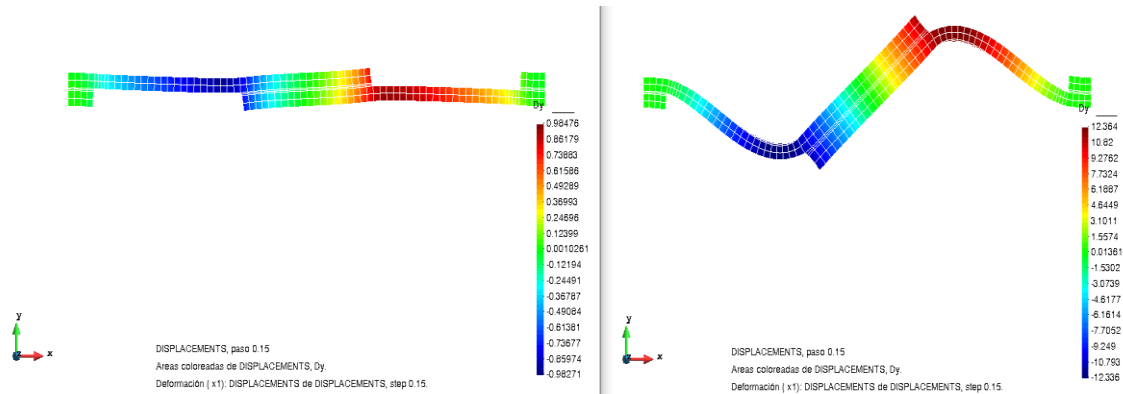


Ilustración 78: Izquierda calculo con grandes deformaciones y derecha calculo con pequeñas deformaciones.

Esto se puede ver de forma muy clara en la ilustración 78, en la que se muestra la deformación del modelo en grandes deformaciones y en pequeñas deformaciones. Las demostraciones que se muestran en la presente figura corresponden a una simulación previa, realizada con materiales elásticos, que ha permitido desarrollar mayores deformaciones y, por tanto, ver mejor comportamiento de ambas formulaciones.

Grandes deformaciones.

Otra observación que se deberá tener en cuenta sobre la curva de desplazamiento de grandes deformaciones es que no es lineal porque a medida que se estira el modelo, se va rigidizando. También ocurre que la simulación de este modelo no finaliza por el motivo que se produce la fractura de la unión.

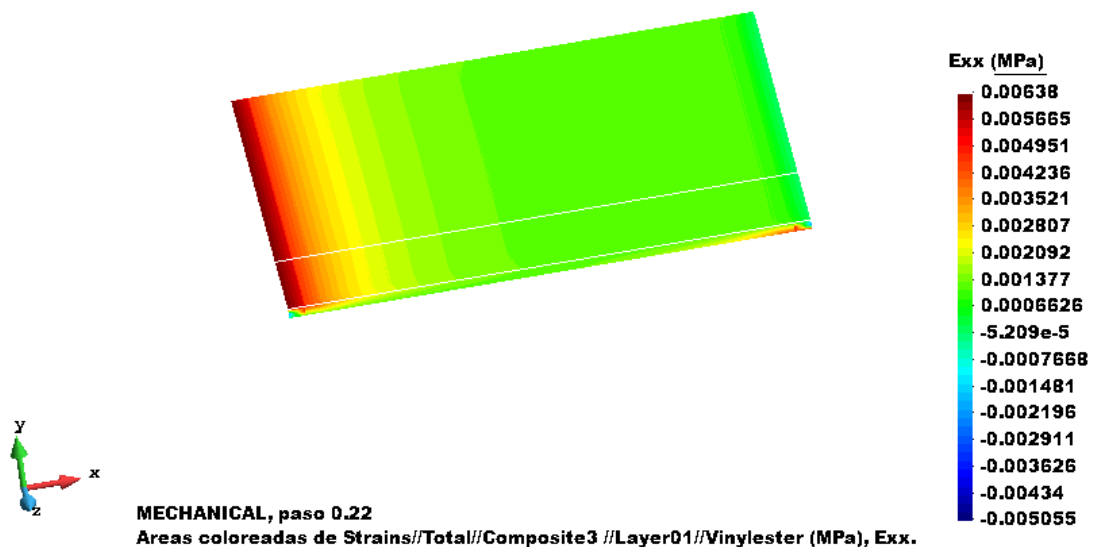


Ilustración 79: Tensiones del solape de viniléster.

Análisis de una unión de materiales compuestos.

Al comparar las cargas máximas del modelo con el modelo experimental está dentro del rango definido.

	*LD	**EXP01	EXP02	EXP03	EXP04	EXP05
Tensión (kN)	4,90	3,73	3,99	4,01	4,60	4,84
Deformación (mm)	0,21	0,19	0,20	0,22	0,26	0,24
*LD: grandes deformaciones.						
**Exp: Experimental.						

Tabla 20: Cargas máxima en grandes deformaciones y experimentales.

7. CONCLUSIONES.

Durante la realización de este trabajo que está compuesto en dos partes, la primera parte del trabajo que se podría decir que es una pequeña introducción a los materiales compuesto porque nos hemos centrado en varios puntos como la clasificación de los materiales compuesto, en cómo se seleccionó el material que se va utilizar en el proyecto de FIBERSHIP, algunas propiedades del material LEO, en la caracterización de los materiales y por último la teoría utilizada, la teoría de mezcla serie-paralelo, pasando posteriormente por los fundamentos de la teoría clásica de Truedell y Toupin que luego fue mejorada por Car (7). Las conclusiones que he sacado de esta primera parte es que cada vez que profundizaba en el tema surgiendo más temas relacionados que no se han tratado en este trabajo como los tipos de infusión que se realizan, los tipos de inspección que se realizan y en definitiva que los materiales compuesto es un temario muy amplio que no se puede abarcar en un solo trabajo.

En la segunda parte del trabajo donde se aprendió los conceptos y ordenes básica del programa para poder ver el comportamiento de las formulaciones utilizadas en modelos sencillos que sabíamos las soluciones analíticas y por último el análisis de la unión de materiales compuesto.

En la familiarización con el programa donde se usaron modelos sencillos podemos sacar la conclusión que para materiales simple que se utilizaron para los modelos 1 y 2, el error se va reduciendo a medida que se aumentas el número de elementos y utilizando elementos lineales cuadráticos. Y, en cambio el comportamiento de los materiales compuesto el error es mayor en malla más fina y elemento cuadrático, esto se debe a que la formulación analítica considera el comportamiento en todas las direcciones del compuesto y en cambio en elementos finitos está considerando la formulación en serie-paralelo que proporciona un comportamiento a cortante del material que es mucho menos rígidos que la formulación en paralelo y a medida que se refina la malla y se usan elementos lineales cuadrático. Estos efectos del cortante aumentan y proporciona la divergencia.

Por último, el modelo de unión de materiales compuesto, que se utilizó para la comparación con el ensayo experimental donde se consigue un mejor resultado con grandes deformaciones que con pequeñas deformaciones. Esto es debido que con grandes deformaciones el modelo se va rigidizando a medida que se estira y también que la rigidez inicial se asemeja más a las experimental. Por último, se podría decir que a la hora de definir las condiciones de borde para hacer la simulación con elementos

Conclusiones

finitos es compleja sin no se va con cuidado podría falsear los resultados finales y también a la hora de asignar los componentes del compuesto que son la fibra y la matriz, se deberá introducir las características mecánica adecuada correspondiente.

8. REFERENCIAS

1. **ULim; Lloyds; Tuco; CIMNE; BV; TWI; COMPASSIS; TSI** . *Fibreship*. 2017.
2. **Barbero, Ever J.** *Introduction to composite materials design [Recurs electrònic]*. [EBOOK] [ed.] CRC Press. s.l. : CRC Press, 2011. ISBN 9781439894132.
3. **Muhammad Ramzan Abdul, Karim.** *Metal matrix composites reinforced with SiC long fibers and*. PhD thesis-Department of Applied Science and Technology (DISAT),. Politecnico di Toriono, Italy : s.n., 2014. pág. 3.
4. **Setién Marquínez, Jesús, y otros.** OCW. <https://ocw.unican.es>. [En línea] UNIVERSIDAD DE CANTABRIA, 2015. [Citado el: 18 de febrero de 2020.] https://ocw.unican.es/pluginfile.php/287/course/section/217/leccion_17.pdf.
5. **SAERTEX.** SAERTEX. [En línea] [Citado el: 25 de enero de 2020.] <https://www.saertex.com/en/products/saertex-leo-serie/lightweight>.
6. **Martinez, X.** *Anàlisi Numèric d'Estructures Navals*. Apunts de l'assignatura impartida al GESTN. Barcelona : FNB, 2018.
7. **Car, E.** *Modelo constitutivo continuo para el estudio del comportamiento mecánico de los materiales compuestos*. PhD thesis, Departament de Resistència de Materials i Estructures a l'Enginyeria(RMEE). s.l. : UPC, 2000. Directors:Sergio Oller and Eugenio Oñate..
8. **Martínez, X.** *-Phd thesis-Micro-mechanical Simulation of composite materials using the serial/parallel mixing theory*. Barcelona : Universidad politecnica de cataluña. , 2008.
9. **Oliver, J., Cervera, M. y Oller, S.** ResearchGate. [En línea] 01 de 1990. https://www.researchgate.net/publication/270215162_Isotropic_Damage_Models_and_Smeared_Crack_Analysis_of_Concrete.
10. **Car, E., S. Oller, S. y Oñate, E.** Tratamiento numérico de los Materiales Compuestos. [aut. libro] S. Oller y E. Oñate E. Car. *Tratamiento numérico de los Materiales Compuestos*. Barcelona : © EL autor, 2000, págs. 129-134.
11. **Martínez, Xavier, Oller, Sergio y Rastellini, Fernando.** 10 . Análisis no-lineal de materiales compuestos mediante la teoría de mezclas serie-paralelo. *Varios*. BARCELONA : Omnia Publisher, 2014, págs. 237-260.
12. **Jurado Granados, Joel, y otros.** *Numerical and experimental procedure for material calibration using the serial/parallel mixing theory, to analyze different composite failure modes*. s.l. : Taylor and Francis Group., 2019.
13. **Car, E., Oller, S. y Oñate, E.** *Plasticidad en grandes deformaciones para materiales compuesto anisotropos parte I: Formulación Teórica*. 1999.

Referencias

14. **Barbero, Ever J.** *Introduction to composite materials design*. Primera. Londres : Taylor and Francis Group, 1998. ISBN 1560327014.
15. **Martinez, X., Oller, S. y Barbero, E.** *Caracterizaciónde la delaminación en materiales compuesto mediante la tenoría de mezclas serie/paralelo*. 2011. págs. 189-199.
16. **Ahadme, Hodayfa Yahyai.** *Estudi d'Unió de Laminats Sandwich*. Treball de l'assignatura Disseny d'Estructures Lleugeres, del MUENO. FNB-Barcelona : Xavier Martínez Garcia, 2018.
17. **CIMNE.** GID HOME. [En línea] -. <https://www.gidhome.com/>.

ANEXO A.

En este anexo se pondrán algunas las tablas que se tuvieron en cuenta durante la selección de material compuesto para el proyecto FiberShip.

Table 1. Initial Matrix of Thermosetting and Thermoplastic Resins for Liquid Resin Infusion – Stage I

	Resin Class	Trade Name	Supplier	Claimed Fire Retardancy	Compatible with Liquid Resin Infusion	Off-the-shelf Availability	Expected Relative Cost
1	Polyester Bio-polyester	Dion FR 820-606 ENVIREZ	Reichhold Ashland	Yes No	Yes Yes	Yes Yes	Baseline TBC
2	Vinylester Vinylester Vinylester Vinylester	DION IMPACT 9102-683 VE 679-03 CORVE 8462 LEO system	Reichhold Scott Bader Interplastic Saertex	TBC TBC Yes Yes	Yes Yes Yes Yes	Yes Yes No - US only Yes	+ + ++ ++
3	Urethane Acrylate	FR Crestapol 1212 Crestapol 1210 or 1250 LV	Scott Bader Scott Bader	Yes No	Yes* Yes	Yes Yes	+++ ++
4	Epoxy Epoxy Bio-Epoxy	Prime 27 SR1125 SuperSap	Gurit SV Sicomim Entropy Resins	No Yes No	Yes Yes Yes	Yes Yes Yes	+++ +++++ TBC
5	Phenolic	Cellobond J2027X / Phencat 382	Hexion	Yes	Yes	Yes	+++
6	Furan (Bio-resin)	Polyfurfuryl Alcohol	Transfurans Chemicals	Yes	TBC	TBC	TBC
7	Infusible Acrylic Thermoplastic	Elium 150	Arkema	No	Yes	Yes**	+++++

Tabla 21: características de las resinas (1)

RESIN CLASS	RESIN/ REINFORCEMENT	RESIN : HARDENER (BY WEIGHT)	VISCOSITY (datasheet)	TOOL	INFUSION TIME ²	INFUSION TEMPERATURE	CURING SCHEDULE	POST-CURING SCHEDULE
VINYLESTER	LEO SYSTEM/ LEO UD 940 gsm Glass	100 : 2	340 cP at 20°C	HEATED ALUMINIUM	20 mins	17.3°C (RT ¹)	Overnight at 30°C	6 hours at 80°C
URETHANE ACRYLATE	CRESTAPOL 1210/ UD 996 gsm Glass	100 : 2 : 1 : 1	175 cP at 25°C	GLASS	11 mins	21.1°C (RT ¹)	60 mins at RT ³	No post-cure required
EPOXY	PRIME 27/ UD 996 gsm Glass	100 : 28	285 cP at 20°C 150 cP at 30°C	GLASS + HEATED MAT	15 mins	18.8°C (RT ¹)	1 hour at 45°C Overnight at RT ¹	7 hours at 65°C
	SR1125/ UD 996 gsm Glass	100 : 14	680 cP at 20°C 305 cP at 30°C 160 cP at 40°C	GLASS + HEATED MAT	40 mins	19.9°C (RT ¹)	16 hours at 40°C	8 hours at 80°C
BIO-EPOXY	SUPER SAP CLR/ UD 996 gsm Glass	100 : 33	300 cP at 25°C	HEATED ALUMINIUM	92 mins	35°C	Overnight at RT ³	2 hours at 120°C
PHENOLIC	CELLOBOND J2027X/ UD 996 gsm Glass	100 : 4	270 cP at 25°C	HEATED ALUMINIUM	36 mins	60°C	15 mins at 60°C	3 hours at 80°C
ACRYLIC THERMOPLASTIC	ELIUM/ UD 996 gsm Glass	100 : 2.5	100 cP at 25°C	GLASS	23 mins	21.9°C (RT ¹)	Overnight at RT ¹	No post-cure required

¹RT = room temperature | ²Time taken from opening of the resin inlet to the closure of the outlet (preform 350 mm x 350 mm)

Tabla 22:Detalle de fabricación de los laminado Etapa 1. (1)

ANEXO B

Tipo de elemento lineal.

Este tipo de elementos consta de 8 nodos por elementos y por lo tanto cada arista tiene dos nodos. Este tipo de elementos se usa normalmente en estructuras donde se aplica una carga de tracción o compresión, también se puede aplicar en estructuras con carga de flexión pero se deberá hacer los elementos más pequeño esto conllevaría a una malla más fina y por lo tanto el tiempo de cálculo es mayor.

Este tipo de elemento hace una regresión lineal entre los resultados de los dos puntos de una arista (6-2) y por ese el cambio curvatura o las deformaciones la hace más bruscamente. Por lo tanto, este tipo de elemento no es adecuado para materiales platicos o que tenga poca rigidez.

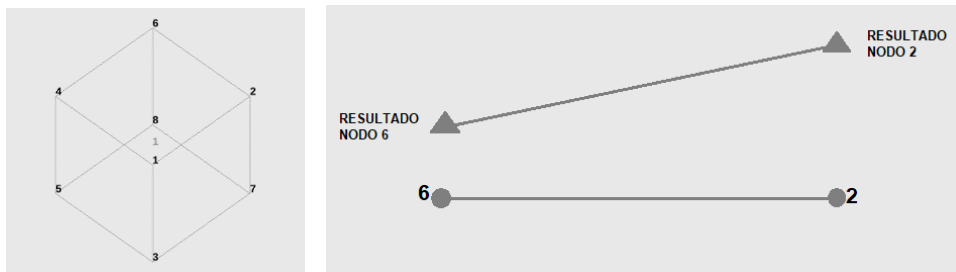


Ilustración 80: Elemento lineal.

Elemento cuadrático.

Este tipo de elemento consta de 20 nodos por elementos y por lo tanto cada arista tiene tres nodos. Se una en estructuras que tenga carga de tipo flexión.

Este tipo de elemento a tener tres nodos por arista permite hacer una curva más ligera, por lo tanto, las curvaturas de las arista o deformaciones son más suaves y por lo tanto mejora los resultados

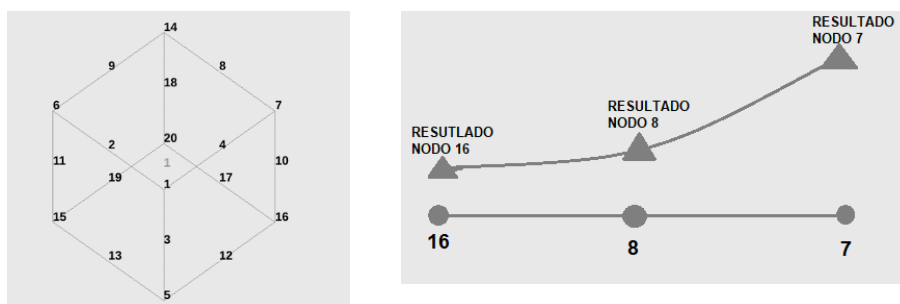


Ilustración 81: Elemento cuadrático.

ANEXO C

En esta segunda parte del trabajo se comenzará a trabajar con opciones más avanzadas del programa como la de generar un modelo no lineal, se cambiará el comportamiento del material a no lineal y se dejará de aplicar la forma de predecir el fallo de máxima tensión y se pasará a predecir con la máxima deformación.

La opción para realizar el modelo no lineal está en el apartado del programa llamado de la siguiente forma “*Non-linear Models y Damage Models*” y las opciones que se podrá definir son las siguientes.

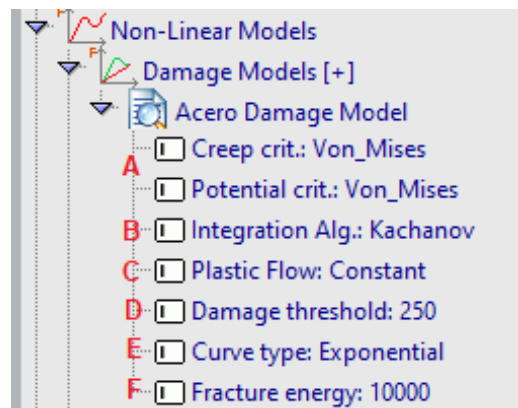


Ilustración 82: Características del modelo no lineal.

- A- Criterio de Von Mises, se elige este modelo porque estamos estudiando cuanto puedo aguantar el material estudiado.
- B- Algoritmo de integración, se basará en la formulada por Kachanov.
- C- Plastic Flow
- D- Es lo máximo que aguanta el material, este valor depende de cada material.
- E- Es el tipo de curva que tiene la gráfica una vez se haiga alcanzado el límite elástico máximo.
- F- Energía de fractura, es la energía disipara para realizar una fractura en el material.

Para cambiar la característica del material a fin de que tenga un comportamiento no lineal se tendrá que seleccionar la opción “*Nonlinear Behaviour: Acero Damage model*”, y esta opción se encontrará en las características de cada material.

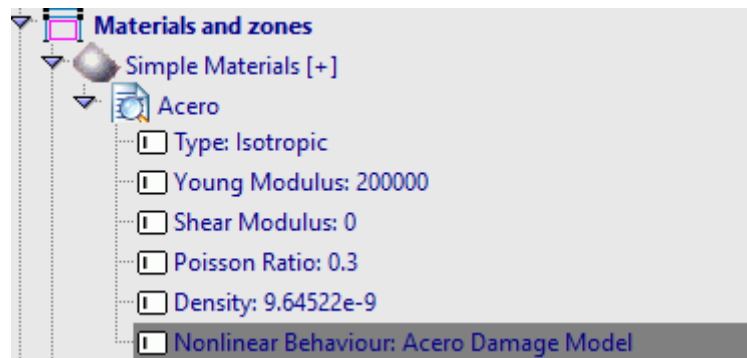


Ilustración 83: Para asumir que el material tenga un comportamiento no lineal.

Como se pasó de la predicción de daño de máxima tensión a máxima deformación, se deberá procesar lo datos obtenido por el programa de GID y obtener la gráfica de fuerza versus desplazamiento, para ello se seguirá el siguiente procedimiento de tres pasos.

Primer paso se tendrá que cambiar los siguientes datos en el documento generado por GID con la extensión acabada en DTS.

<pre> CURV, 3 ReaccionTotalX X:RCTOT, 1 Y:RCTOT, 1 ReaccionTotalY X:RCTOT, 1 Y:RCTOT, 2 ReaccionTotalZ X:RCTOT, 1 Y:RCTOT, 3 </pre>		<pre> CURV, 1 DesplZ X:DISPL, 30 3 1 Y:RCTOT, 3 </pre>
--	--	--

Ilustración 84: Datos que modificar para obtener la gráfica vs desplazamiento.

Estos cambios nos generarán un documento con la extensión con la siguiente nomenclatura AA o AB o AC etc.... en estos documentos generados estarán los desplazamientos que deseamos. Para obtener este desplazamiento se introducirá la función "X: DISPL" y a continuación unas series de numero como se puedes mostrar en la ilustración 84 derecha.

Para clarificar más esto cambio se pondrá un ejemplo:

CURV, 1
X: DISPL.
ABC

- CURV,1 es para definir más de una curva en el mismo documento y el número es para definir cuantas curvas se van a generar.
- X: DISPL, se refiere el tipo de grafica que se desea conseguir.
- La A corresponde a un punto donde se aplica la fuerza o el desplazamiento dado al modelo.
- La B corresponde al eje que desea saber los resultados y esta letra puede tener los siguientes valores:
 - 1= eje X
 - 2= eje Y
 - 3= eje Z
- La C corresponde a la lo que desea saber y esta letra puede tener los siguientes valores:
 - 1= el desplazamiento,
 - 2 =la velocidad
 - 3= la aceleración

Segundo paso se ejecutará el programa potable llamado PLCd16 y para ejecutar este programa se deberá realizar mediante la ventana de comando del pc. Una vez que se esté em el panel de comando, se deberá poner el directorio donde se encuentra el programa ejecutable primera línea de la ilustración, después se deberá ejecutar el PLCd16 segunda línea de la ilustración y a ejecutarlo pedirá el nombre del documento tercera línea de la ilustración.

```
C:\Users\Juan>cd C:\Users\Juan\Desktop\RunPLCd
C:\Users\Juan\Desktop\RunPLCd> PLCd16

NOMBRE PROBLEMA (con extension): Viga20x20v02.DTS
```

Ilustración 85: Comandos para ejecutar PLCd16.

Tercer paso una vez acabado el proceso del ejecutable PLCd16 se te genera un documento con la siguiente extensiones AA, AB, AC, etc.. esto dependerá de la cantidad de gráfica se le haiga definido en el documento DTS. A partir de este documento se podrá generar la gráfica fuerza versus desplazamiento utilizando cualquier programa de generar grafica.

ANEXO D

(10)

4.4 Extensión de la teoría clásica a grandes deformaciones

En este apartado se presenta la extensión al campo de las deformaciones finitas de la teoría de mezclas clásica. Esta extensión es necesaria debido a que permite tener en cuenta los fenómenos de alineación de la fase de refuerzo con respecto a la dirección del esfuerzo al que está sometido el material. En el Apartado 7.3 se presenta un ejemplo que ilustra el fenómeno mencionado y muestra como esta extensión de la teoría de mezclas permite simular este fenómeno.

4.4.1 Ecuación de cierre

La tercera hipótesis en la que se basa la teoría de mezclas supone que en ausencia de difusión atómica la deformación es idéntica para todos los componentes del compuesto. Esta hipótesis se debe verificar tanto en la configuración referencial como en la configuración espacial para cada fase. En la configuración referencial la condición de compatibilidad de deformaciones está dada por (Trusdell y Toupin, 1960) (Oñate *et al.*, 1991):

$$E_{IJ} \equiv (E_{IJ})_1 = (E_{IJ})_2 = \dots = (E_{IJ})_n \quad (4.27)$$

donde $E_{IJ} = \frac{1}{2}(C_{IJ} - G_{IJ})$ es el tensor de deformaciones de Green-Lagrange donde \mathbf{G} es el tensor métrico material que para un sistema de coordenadas ortogonales se escribe como $G_{IJ} = I_{IJ} = \delta_{IJ} \begin{cases} 0 & \text{si } I \neq J \\ 1 & \text{si } I = J \end{cases}$ y $\mathbf{C} = \mathbf{F}^T \mathbf{F}$ es el tensor de deformaciones derecho de Cauchy-Green.

En la configuración actualizada la condición de compatibilidad de deformaciones se propone como:

$$e_{ij} \equiv (e_{ij})_1 = (e_{ij})_2 = \dots = (e_{ij})_n \quad (4.28)$$

donde $e_{ij} = \frac{1}{2}(g^{ij} - (b_{ij})^{-1})$ es el tensor de deformaciones de Almansi, $\mathbf{b} = \mathbf{F}\mathbf{F}^T$ es el tensor de deformaciones izquierdo de Cauchy-Green y g_{ij} es el tensor métrico espacial dado por:

$$g_{ij} = I_{ij} = \delta_{ij} \begin{cases} 0 & \text{si } i \neq j \\ 1 & \text{si } i = j \end{cases} \quad (4.29)$$

y F es el gradiente de deformaciones $F_{iJ} = \frac{\partial x_i}{\partial X_J}$ ³ (Santalo, 1981)

³ La relación entre el tensor de tensiones de Almansi y el de Green-Lagrange se muestra en el Apéndice A

Teniendo en cuenta la definición del tensor derecho de Cauchy-Green y la ec.(4.27) se obtiene la ecuación de cierre en función de los gradientes de deformaciones:

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 = \mathbf{F}_2 = \dots = \mathbf{F}_n \quad (4.30)$$

Esta hipótesis vale rigurosamente sólo si se aplica la teoría de mezclas para materiales con comportamiento en paralelo, es decir, que el estado tensional del compuesto resulta de la suma de las tensiones de cada componente proporcional al volumen que ocupan respecto del total, ej.: matriz con fibras largas, hormigón armado, etc. En el caso de matriz con refuerzo de fibras cortas la hipótesis de que las deformaciones de todos los componentes es igual no es válida. Para solucionar este inconveniente existen dos alternativas: definir otra ecuación de cierre que permita simular adecuadamente los fenómenos que se producen en el material (ver Apartado 4.3) o realizar una corrección en las propiedades de cada componente y mantener la ecuación de cierre de la teoría de mezclas clásica (ec.4.28).

4.4.2 Función de energía libre

Los materiales compuestos que cumplen con la ec.(4.28) y ec.(4.27), satisfacen también la condición básica de la aditividad de la energía libre de sus componentes tanto en la configuración referencial como en la actualizada (Trusdell y Toupin, 1960):

$$m^0 \Psi(\mathbf{E}^c, \theta, \alpha^m) = \sum_{c=1}^n k_c m_c^0 \Psi_c[\mathbf{E}, (\mathbf{E}^p)_c, \theta, \alpha_c^m] \quad (4.31)$$

$$m \psi(\mathbf{e}^c, \theta, \alpha^m) = \sum_{c=1}^n k_c m_c \psi_c[\mathbf{e}, (\mathbf{e}^p)_c, \theta, \alpha_c^m] \quad (4.32)$$

donde Ψ_c y ψ_c son las energías libres correspondientes a cada una de las "n" sustancias componentes de la mezcla definidas en la configuración referencial y la actualizada respectivamente, k_c es el coeficiente de participación volumétrica, $(\mathbf{E}^p)_c$ y $(\mathbf{e}^p)_c$ son las deformaciones plásticas de cada fase en las configuraciones referencial y actualizada respectivamente y α_c^m son las variables internas del componente $c^{ésimo}$ que definen el comportamiento físico de cada sustancia componente.

La teoría de mezcla de sustancias básicas aquí utilizada se basa en que todas las sustancias intervienen en la respuesta del compuesto en forma proporcional al volumen que ocupan respecto del volumen total. El coeficiente de participación volumétrica se define en la configuración referencial como:

$$k_c = \frac{dV_c}{dV_0} \quad (4.33)$$

donde V_c es el volumen del componente y V_0 es el volumen total del compuesto en la configuración referencial.

La ecuación de continuidad establece que:

$$\frac{dv_0}{dV_0} = \det \mathbf{F} = J \quad (4.34)$$

donde v_0 es el volumen del compuesto en la configuración actualizada. Teniendo en cuenta la ecuación de cierre (ec. 4.30) se deduce:

$$\frac{dv_c}{dV_c} = \det \mathbf{F}_c = J \Rightarrow dV_c = \frac{1}{J} dv_c \quad (4.35)$$

La ec.(4.35) establece que la relación entre el volumen de un componente en la configuración espacial y el volumen del componente en la configuración referencial está dado por el determinante del gradiente de deformaciones. Teniendo en cuenta las ecs.(4.35), (4.33) y se tiene:

$$k_c = \frac{1}{J} \frac{dv_c}{dV_0} = \frac{dv_c}{dv_0} \quad (4.36)$$

La ec.(4.36) muestra que el coeficiente de participación se mantiene constante en ambas configuraciones. El coeficiente de participación volumétrico de cada componente debe cumplir con la siguiente condición que garantiza la conservación de la masa:

$$\sum_{c=1}^n k_c = 1 \quad (4.37)$$

4.4.3 Ecuación constitutiva

Una vez definida la función de energía libre a los fines de simular el material compuesto es necesario definir la ecuación constitutiva del mismo. A continuación se presenta la ecuación constitutiva tanto para la configuración referencial como para la actualizada.

Configuración referencial

La definición de la tensión para el compuesto \mathbf{S} se obtiene a partir de la formulación del modelo hiperelástico garantizando la condición de disipación del segundo Principio de la Termodinámica (Malvern, 1969), esto es:

$$\mathbf{S} = m^0 \frac{\partial \Psi}{\partial \mathbf{E}} = \sum_{c=1}^n \frac{m^0}{m_c^0} k_c \frac{\partial \Psi_c}{\partial \mathbf{E}} = \sum_{c=1}^n \frac{m^0}{m_c^0} k_c (\mathbf{S})_c \quad (4.38)$$

Siguiendo un procedimiento similar al utilizado en los Apartados 4.2 y 4.5 el tensor tangente constitutivo del compuesto está dado por:

$$\mathbf{c}^T = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \mathbf{E} \otimes \partial \mathbf{E}} = \sum_{c=1}^n k_c (\mathbf{c}^T)_c \quad (4.39)$$

donde $(\mathbf{c}^T)_c$ representa el tensor constitutivo tangente anisótropo real para el componente $e^{sim\sigma}$.

Configuración actualizada

En forma análoga a la configuración referencial, la definición de la tensión para el compuesto $\boldsymbol{\tau}$ se obtiene a partir de la formulación del modelo hiperelástico garantizando la condición de disipación del Segundo Principio de la Termodinámica (Malvern, 1969). Esto es:

$$\boldsymbol{\tau} = m \frac{\partial \psi}{\partial \mathbf{e}} = \sum_{c=1}^n \frac{m}{m_c} k_c \frac{\partial \psi_c}{\partial \mathbf{e}} = \sum_{c=1}^n \frac{m}{m_c} k_c (\boldsymbol{\tau})_c \quad (4.40)$$

Siguiendo un procedimiento similar al utilizado en los Apartados 4.2 y 4.5 el tensor tangente constitutivo del compuesto en la configuración actualizada, está dado por:

$$\mathbf{c}^T = \frac{\partial^2 \psi}{\partial \mathbf{e} \otimes \partial \mathbf{e}} = \sum_{c=1}^n k_c (\mathbf{c}^T)_c \quad (4.41)$$

donde $(\mathbf{c}^T)_c$ representa el tensor constitutivo tangente anisótropo real para el componente $e^{sim\sigma}$.

En la Figura 4.2 se observa un diagrama de flujo esquemático a seguir en la solución de problemas no-lineales en deformaciones finitas de un material compuesto multifase por el MEF. En la misma se observa que cada fase tiene su propio modelo constitutivo y resulta independiente de las otras fases que conforman el compuesto.

El algoritmo comienza en la configuración referencial y luego a través de las operaciones de transporte push-forward (ver Apéndice A) se plantea la ecuación constitutiva para cada uno de las fases del material compuesto. Cada una de estas fases puede presentar distintos modelos constitutivos (plasticidad, daño, etc.) que a su vez pueden ser isótropos o anisótropos. Una vez determinado el estado tensional de cada uno de los componentes es necesario determinar la tensión del material compuesto, teniendo en cuenta la ec. (4.7), que permite determinar las fuerzas internas que se desarrollan en el material. Una vez determinadas las fuerzas internas es necesario verificar el equilibrio de estas con las fuerzas externas aplicadas.