

CAPÍTULO N°5: MODELO DE ELEMENTOS FINITOS DE PANELES SÁNDWICH

- 5.1. ESTUDIOS PREVIOS**
- 5.2. MODELADO DEL NÚCLEO “HONEYCOMB”**
- 5.3. MODELADO DE LA PIEL**
- 5.4. MODELADO DEL ADHESIVO**
- 5.5. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS**
- 5.6. ANÁLISIS DEL MODELO**
- 5.7. RESULTADOS**

5.1. ESTUDIOS PREVIOS

De forma previa a la realización del modelo de elementos finitos se realizó una búsqueda bibliográfica relacionada con materiales compuestos, más concretamente con estructuras tipo sándwich. El objetivo principal de esta búsqueda era conocer cómo se habían realizado otros modelos de elementos finitos de estas estructuras, sobre todo del núcleo, que es lo que más dificultad planteó al principio del desarrollo del modelo, por el desconocimiento que se tenía de ello. Básicamente se llegó a tres conclusiones en lo referente al tipo de elementos para modelar el núcleo:

- Mediante elementos sólidos

El primero de ellos se emplea sobre todo para modelar núcleos tipo “foam”, aunque también se puede emplear para modelar núcleos tipo “honeycomb”, empleando de forma adecuada las propiedades ortótropas equivalentes.

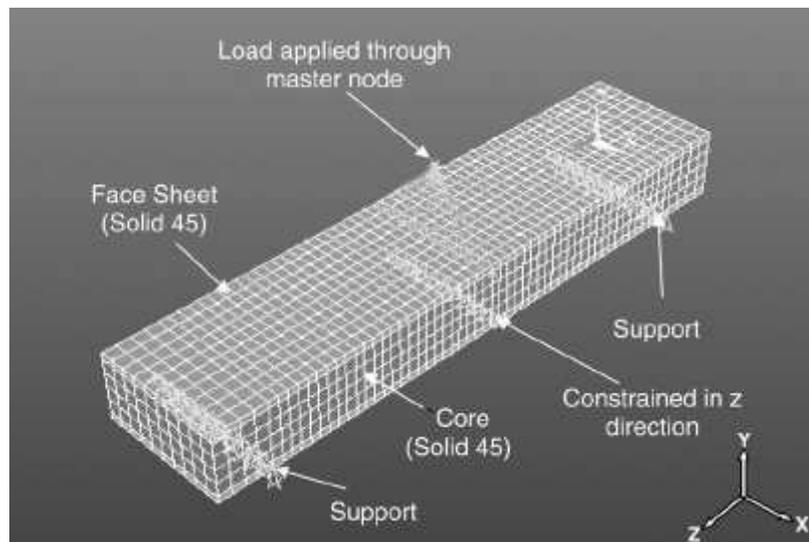


Figura 31. Modelo de EF de elementos sólidos para núcleo.

- Mediante elementos tipo placa

El modelo del núcleo mediante elementos placas se emplea para modelar núcleos “honeycomb”, representando la geometría exacta de cada una de las celdillas que constituyen el núcleo de la estructura sándwich en cuestión.

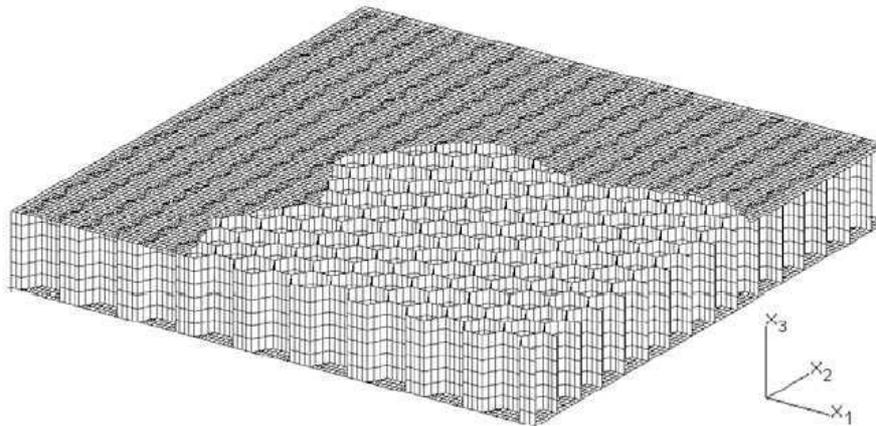


Figura 32. Modelo de EF de elementos placa para núcleo honeycomb.

- Mediante elementos tipo muelle

Los elementos tipo muelle pueden modelar la rigidez según 6 grados de libertad (correspondientes a los 3 desplazamientos y los 3 giros). Se suelen emplear para modelar problemas de impacto.

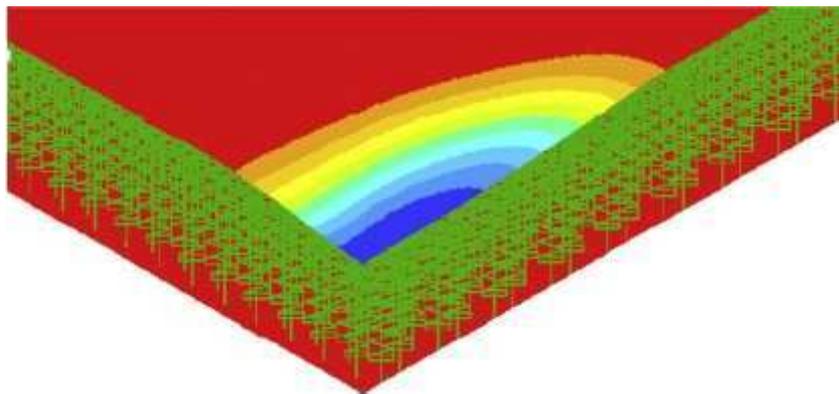


Figura 33. Modelo de EF de elementos muelle para núcleo.

En cuanto al resto de componentes de un panel sándwich también existen varias opciones de modelado. Las láminas de material compuesto, que constituyen la cara útil y la cara bolsa de un panel sándwich, se pueden modelar mediante elementos tipo placa o elementos sólidos. El programa de elementos finitos Nastran-Patran tiene un paquete de materiales compuestos, el cual permite darle a un elemento tipo placa las propiedades de un laminado, constituido por el número de láminas que sea con sus propiedades determinadas. La otra opción es modelar cada una de las láminas que constituyen el laminado mediante un sólido. Si todas las láminas que constituyen el laminado tienen la misma orientación se podría modelar con este elemento.

El otro componente de un panel sándwich susceptible de ser modelado es el adhesivo. Éste se debe modelar con elementos sólidos, ya que una de las principales

cargas que soportará la capa de adhesivo serán cargas de pelado, perpendiculares al plano que constituye la capa de adhesivo, y los elementos placa no son capaces de modelar cargas perpendiculares al plano del elemento. También se puede modelar con elementos tipo muelle o con elementos rígidos.

5.2. MODELO DEL NÚCLEO “HONEYCOMB”

De entre las distintas formas de modelar el núcleo se optó por hacerlo mediante elementos sólidos, ya que, aunque supone un mayor coste computacional que los elementos tipo placa, se descartó la opción de modelar la estructura “honeycomb” como tal por el esfuerzo y el tiempo que supondría generar la geometría de todas las celdillas de la estructura sándwich. La ventaja de modelar las celdillas de la estructura “honeycomb” es que se reproduce de forma detallada la geometría real, pero no se quiere llegar a tal nivel de detalle en este proyecto, lo que se persigue es representar el comportamiento de un panel sándwich de una forma equiparable a los cálculos que se realizan a diario en proyectos industriales, y no a nivel de un estudio de investigación. Además, precisamente por esto, no es necesario emplear una malla muy fina, por lo que el coste computacional no será excesivamente elevado, aunque se modele el núcleo con elementos sólidos.

En la mayoría de los estudios en los que se emplean elementos placa el objetivo es modelar una celdilla, y los que modelan un número de celdillas considerable utilizan un programa que les genera la geometría de todas las celdillas a partir de unos parámetros de entrada, parámetros geométricos y el número de celdillas que se quiere generar.

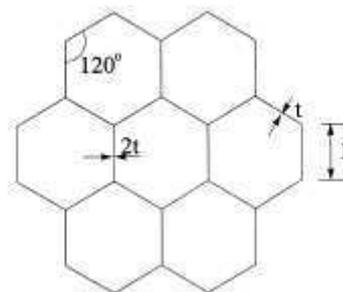


Figura 34. Geometría estructura honeycomb.

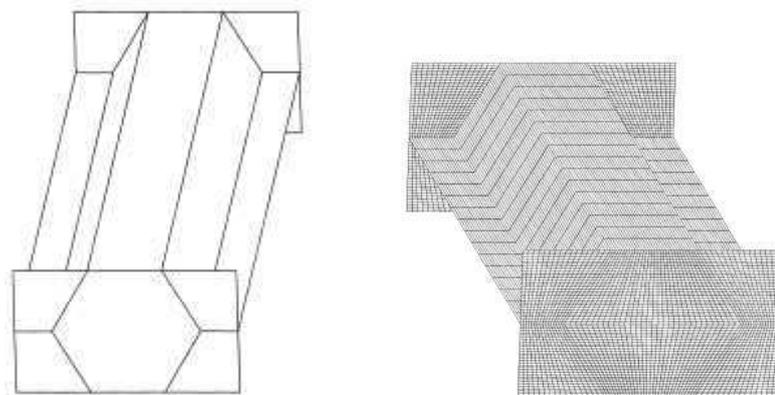


Figura 35. Geometría de una celdilla y mallado mediante elementos placa.

El modelo mediante muelles tiene dos inconvenientes fundamentales que han

condicionado a no utilizarlo: por un lado, no permiten modelar la flexión en estructuras sándwich, y, por otro, hay que darles una rigidez equivalente a las propiedades del núcleo, las cuales se desconocen.

No se ha mencionado que también se podría modelar el core con elementos placa, pero no representando la geometría de las celdillas del “honeycomb”, sino como una lámina más del laminado definido para las pieles, es decir, un modelo plano del panel. Se descarta esta solución porque queda restringida a núcleos relativamente rígidos y de poca altura.

A partir de ahora el estudio se centrará en el modelado sólido del núcleo, ya que ésta es la solución final adoptada. Como se comentó anteriormente, las propiedades que hay que darles a los elementos sólidos son las propiedades equivalentes homogéneas ortótropas de la estructura “honeycomb”. Se han tenido en cuenta varios artículos que tratan de buscar una estimación de las propiedades equivalentes de un núcleo continuo. Concretamente, en el artículo “*Assessment of continuum models for sandwich panel honeycomb cores*”, se desarrollan unas expresiones para estimar las propiedades efectivas del núcleo “honeycomb” como un material homogéneo continuo. Estas expresiones permiten estimar las propiedades efectivas del núcleo continuo en función de una serie de parámetros. Los parámetros son función del material y de la geometría.

Parámetros del material: Módulo de Young (E_s), módulo de cortadura (G_s) y densidad del material del que está constituido el núcleo (ρ_s).

Parámetros geométricos: l_1 , l_2 , θ , t_c , η .

$$\eta = \frac{2l_2}{l_1}$$

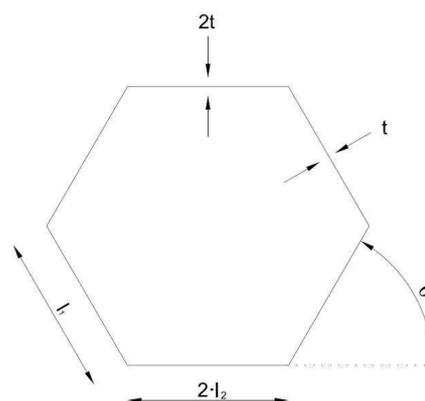


Figura 36. Parámetros geométricos de una celdilla de la estructura honeycomb.

Las expresiones para las propiedades efectivas del modelo del núcleo continuo se detallan a continuación:

- Densidad del core continuo:

$$\frac{\rho_c}{\rho_s} = \frac{(1+\eta)}{(\eta + \cos(\theta)) \sin(\theta)} \left(\frac{t_c}{l_1} \right)$$

- Propiedades en el plano del core continuo:

$$E_1^c = E_s \left[\frac{1}{(\sin(\theta)) \left(\lambda \sin^2 \theta / (\eta + \cos \theta) (t_c / l_1)^3 + (\eta + \cos^2 \theta) / (\eta + \sin \theta) (t_c / l_1) \right)} \right]$$

$$E_2^c = E_s \left[\frac{1}{(\eta + \cos \theta) \left(\lambda \cos^2 \theta / (t_c / l_1)^3 + (\sin^2 \theta) / (t_c / l_1) \right)} \right]$$

$$\nu_{12}^c = \left[-\cos(\theta) \left[\frac{(-\lambda / (t_c / l_1)^3 + 1 / (t_c / l_1))}{(\lambda \sin^2 \theta / (t_c / l_1)^3 (\eta + \cos \theta) + \cos^2 \theta / (t_c / l_1) (\eta + \sin \theta))} \right] \right]$$

$$G_{12}^c = E_s \left(\frac{t_c}{l_1} \right)^3 \frac{(\eta + \cos \theta)}{\eta^2 (1 + \eta / 4) \sin \theta}$$

- Módulo de Young transversal y coeficientes de Poisson transversales del core continuo:

$$E_3^c = E_s \frac{(1+\eta)}{(\eta + \cos \theta) \sin \theta} \left(\frac{t_c}{l_1} \right)$$

$$\nu_{31}^c = \nu_{32}^c = \nu_s$$

$$\nu_{31}^c = \frac{E_1^c}{E_3^c} \nu_s$$

$$\nu_{32}^c = \frac{E_2^c}{E_3^c} \nu_s$$

- Límites inferior y superior para los módulos de cortadura transversal del core continuo:

$$G_{23LB}^c = G_{23UB}^c = G_{23}^c = G_s \frac{\sin \theta}{(\eta / \cos \theta)} \left(\frac{t_c}{l_1} \right)$$

$$G_{13LB}^c = G_s \frac{(\eta + \cos \theta)}{(1 + 4\eta) \sin \theta} \left(\frac{t_c}{l_1} \right)$$

$$G_{13UB}^c = G_s \frac{(\eta + \cos^2 \theta)}{(\eta + \cos \theta) \sin \theta} \left(\frac{t_c}{l_1} \right)$$

En el artículo “A finite element study of tranverse shear in honeycomb cores” se desarrollan unas expresiones para G_{13} y G_{23} .

$$\frac{1 + R_2 \sin \theta}{R_2 (1 + R_2) \cos \theta} R_1 G \leq G_{xz} \leq \frac{1 + R_2 \sin^2 \theta}{R_2 (1 + R_2 \sin \theta) R_2 \cos \theta} R_1 G$$

$$G_{yz} = \frac{\cos \theta}{1 + R_2 \sin \theta} R_1 G$$

Donde G es el módulo de cortadura del material del que está constituido el núcleo, y el resto son parámetros geométricos que se definen a continuación:

$$R_1 = \frac{t}{b}; \quad R_2 = \frac{a}{b}; \quad R_3 = \frac{h}{a}; \quad R_4 = \frac{t'}{t}$$

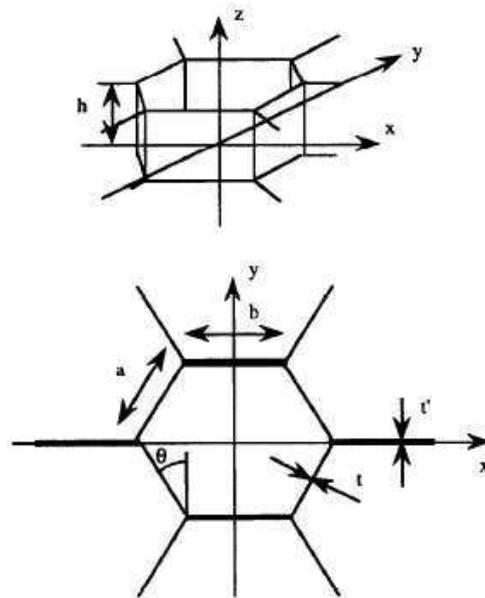


Figura 37. Parámetros geométricos de una celdilla de la estructura honeycomb.

Las expresiones indicadas anteriormente, tanto las desarrolladas en un artículo como en el otro, calculan las propiedades homogéneas equivalentes ortótropas de la estructura “honeycomb” a partir de las propiedades constitutivas del material del que está constituido la estructura “honeycomb”.

5.3. MODELADO DE LA PIEL

Las pieles son los revestimientos del núcleo, como se ha presentado en el capítulo 2 del presente documento.

Los laminados son distintos en cada una de las zonas del panel, va disminuyendo el número de láminas conforme aumenta la altura del núcleo, es decir, del laminado que constituye la pista hay algunas telas que continúan por la rampa, y otras que se cortan justo al comienzo de la rampa, a éstas últimas se les suele llamar telas de relleno. De las telas que continúan en la rampa tampoco suben todas a la zona bulk.

Se deben cumplir una serie de reglas que se deben tener en cuenta en el diseño de un panel sándwich:

- La tela exterior del panel, tanto en la cara útil como en la cara bolsa, debe ser continua.
- Debe ser continua la tela que sube por la rampa pegada al núcleo.

Para cumplir estas reglas el número mínimo de telas en la zona bulk será dos en cada uno de los revestimientos, aunque no es recomendable usar un número de telas muy bajo porque se podrían producir problemas de ingestión de agua. Hay que llegar a una solución de compromiso entre el problema de ingestión de agua y el peso.

También hay que resaltar que los laminados que constituyen las dos caras del panel no tienen que ser simétricos el uno con respecto al otro, ni siquiera el número de telas que constituyen cada una de ellas tiene que ser el mismo. En cuanto a cada laminado, tampoco tiene que ser simétrico con respecto a su plano medio. Sin embargo, es recomendable que los laminados sean simétricos entre sí, y el uno con respecto al otro, para así dar lugar a una estructura sándwich lo más simétrica posible, y evitar, en la medida de lo posible, los efectos que se producen cuando una estructura laminada no es simétrica. En un laminado no simétrico se produce acoplamiento entre efectos de laja y de placa, lo que puede producir en algunos casos configuraciones deformadas no previstas.

Como se ha comentado anteriormente los laminados de las distintas zonas del panel sándwich se pueden modelar con elementos sólidos o con elementos placa.

En el modelo con elementos sólidos se tendría que emplear un sólido que modelase cada lámina, no puede modelarse el laminado como un único sólido porque el laminado del panel sándwich que se quiere modelar tiene láminas con distintas orientaciones, por lo que a cada uno de los sólidos habrá que darle las propiedades de cada lámina correspondientes a la orientación que tenga cada una de ellas, es decir, habrá que girar las propiedades para aquellas láminas que tengan una orientación distinta a 0°.

Para los elementos tipo placa el programa Nastran-Patran permite definir un laminado (mediante la tarjeta PCOMP), del cual hay que indicar de qué material está constituida cada lámina, y el espesor y orientación de cada una de ellas.

La elección que se ha tomado en este proyecto para modelar las pieles es hacerlo con elementos tipo placa, y las razones principales son las siguientes:

- Facilidad de modelado, debido a que el programa Nastran-Patran permite definir un laminado de forma sencilla.
- Coste computacional inferior al de elementos sólidos.

5.4. MODELADO DEL ADHESIVO

El adhesivo se puede modelar con elementos sólidos, o con elementos tipo muelle. Pero con estos elementos no se modela bien el comportamiento del adhesivo, ya que la ley de comportamiento que presentan es lineal. Para modelar bien el comportamiento del adhesivo habría que emplear elementos cohesivos, que son unos elementos que tienen una ley de comportamiento que degrada las propiedades.

El programa Nastran-Patran no tiene implementado los elementos cohesivos, por lo que quedan descartados de las posibles opciones para modelar el adhesivo.

Si no se emplean elementos cohesivos habría que degradar las propiedades a mano, es decir, mediante un proceso iterativo ir degradando las propiedades de los elementos que van fallando en cada iteración. Esto sería bastante engorroso.

En el presente estudio se ha decidido no modelar el adhesivo, principalmente por las siguientes razones:

- Falta de información del adhesivo empleado.
- Dificultad de modelar el comportamiento del adhesivo con los recursos que tiene Nastran-Patran.

5.5. MODELO ELEMENTOS FINITOS

Se pasa a describir el modelo de elementos finitos empleado para obtener los resultados deseados.

Las unidades que se han utilizado a la hora de introducir los datos en el programa son las siguientes:

- Longitudes: mm
- Cargas: N
- Constantes de rigidez: N/mm^2 (MPa)

En el modelo es necesario utilizar unidades que sean congruentes para obtener los resultados en las unidades deseadas. Los valores de las tensiones obtenidas estarán en MPa, las deformaciones vendrán dadas de forma adimensional y los desplazamientos en mm.

5.5.1. GEOMETRÍA

La pieza objetivo del modelo es una probeta de la parte de la rampa de un panel sándwich. Se puede visualizar en la siguiente foto.



Figura 38. Probeta sándwich de carbono.

Esta pieza se ha ensayado a flexión, y en este documento se ha hecho un estudio mediante el MEF de dicho ensayo. Más detalles del ensayo se dan en el siguiente capítulo, donde se comparan también los resultados del modelo de elementos finitos con los experimentales.

Los datos geométricos se toman de la especificación de dicho ensayo, siendo los siguientes.

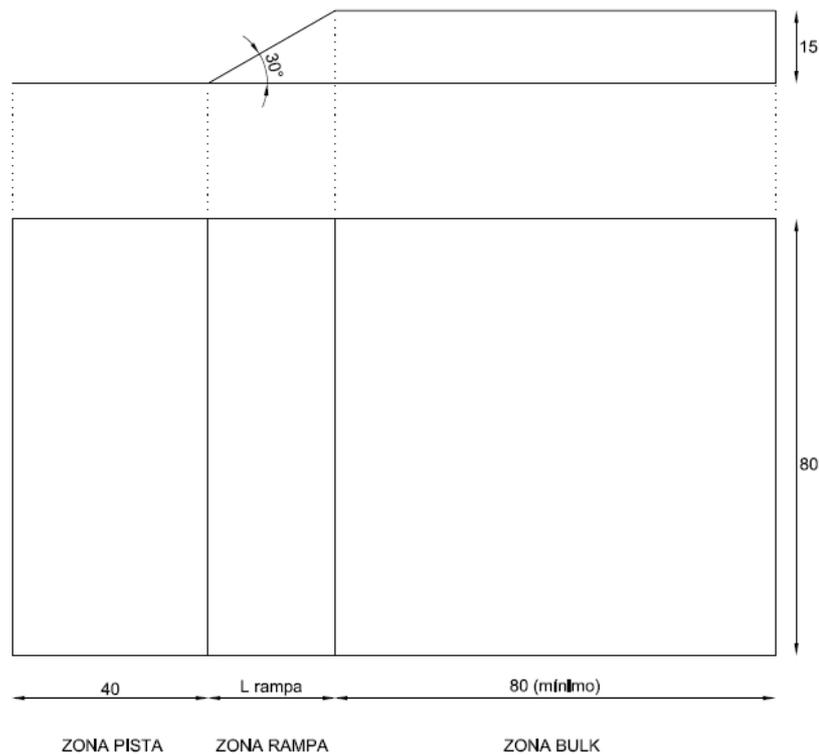


Figura 39. Especificación datos geométricos de la probetas.

La longitud de la rampa viene determinada por la altura del núcleo y el ángulo de rampa (α) mediante la siguiente expresión.

$$L_{ramp} = \frac{H_{core}}{\tan \alpha}$$

El valor de la longitud de rampa para un ángulo de 30° y una altura de core de 15 mm es de 25.98 mm. Se ha modelado una longitud de zona bulk de 90 mm. El resto de dimensiones vienen indicadas en la Figura 39.

En la siguiente figura se puede ver la geometría del modelo, que como se puede observar es bastante sencilla, constituida por 5 superficies, cada una de las cuáles modela el laminado de los revestimientos en cada una de las zonas del panel. Una superficie para la pista, una para cada revestimiento de la rampa y otra para cada revestimiento en la zona bulk. Se han definido 2 sólidos, uno que modela el núcleo correspondiente a la rampa, y otro para el núcleo en la zona bulk.

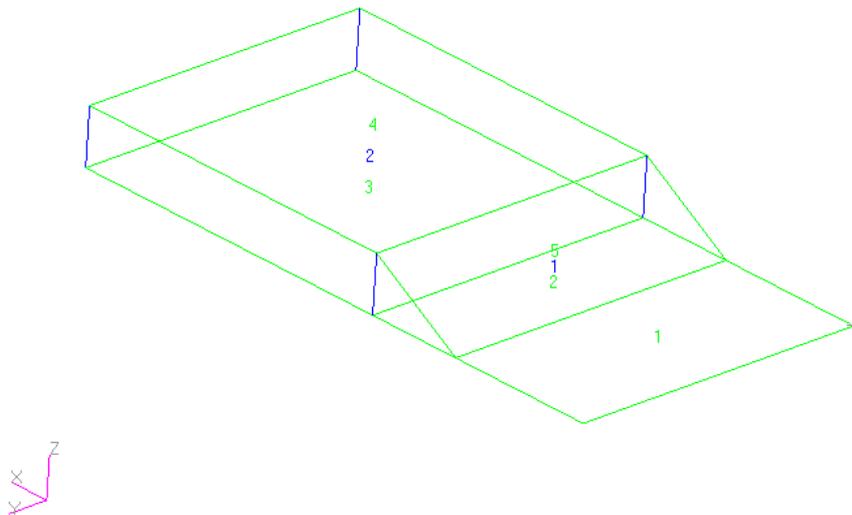


Figura 40. Geometría del modelo.

Es muy importante comprobar las normales de las superficies, porque cuando se realice el mallado, los elementos deben tener la componente z en el sentido de la normal de la superficie mallada. Se comprueba que las normales van en ese sentido y dirección.

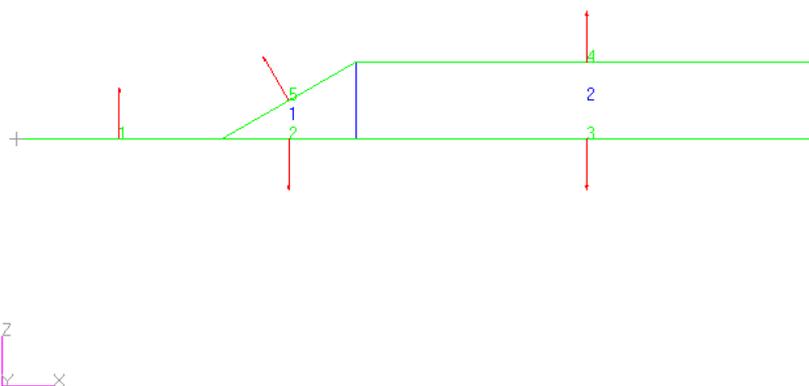


Figura 41. Normales de las superficies que modelan las caras del sándwich.

5.5.2. ELEMENTOS Y MALLADO

A la hora de elegir el tipo de elementos a utilizar en el modelo hay que tener en cuenta también que el proceso de cálculo de elementos finitos lleve a una solución numérica convergente, es decir, que conforme se aumente el número de elementos la solución numérica tienda a la exacta. Las condiciones que los elementos deben cumplir para que se de esta convergencia son dos: capacidad de reproducir un estado constante y compatibilidad entre elementos.

En el caso elástico un elemento es capaz de reproducir un estado constante si las funciones de forma contienen un polinomio completo hasta el orden 1, es decir, lineal.

Para que se dé la compatibilidad entre elementos se debe garantizar la existencia de continuidad de la derivada de orden 0, es decir continuidad C0.

Los elementos lineales cumplen las dos condiciones para el caso elástico, y son el tipo de elementos que se toman a la hora de modelar el problema.

En el modelo se emplean dos tipos de elementos, planos para las pieles y sólidos para el núcleo. Mediante el mallador Isomesh se ha mallado la geometría definida con los siguientes elementos:

- Piel: CQUAD4
- Núcleo: Hex8

Es recomendable usar al menos 3 elementos sólidos en la dirección de la altura del núcleo. También se debe mantener la relación de aspecto de los elementos.

Conviene destacar que los elementos placa tienen grados de libertad de rotación extra con respecto a los elementos sólidos. Para evitar las rotaciones no homogéneas en la interfaz elementos placa-sólido se deben usar mallas de igual densidad. Cada elemento placa debe ser congruente con un elemento sólido. El giro de torsión de los elementos placa debe ser restringido adecuadamente (mediante el comando de Nastran K6ROT).

Dado que las mallas obtenidas para cada superficie y para cada sólido son independientes, para acabar con el mallado de la pieza es necesario eliminar los nodos redundantes, es decir, los que están en la misma posición, esta operación se lleva a cabo de forma sencilla en el programa (mediante la orden Equivalence), y lo que hace es transformar los nodos redundantes en uno solo.

El tamaño medio de los elementos es de unos 2.5 mm. No es una malla muy fina pero en este proyecto no se pretende afinar mucho los resultados, sino más bien reproducir el comportamiento estructural de la pieza. Por esta razón no se refinará la malla. En la zona de la rampa los elementos sólidos sufren distorsión para poder

mallar la esquina del comienzo de rampa.

En las siguientes figuras se puede observar el modelo de elementos finitos de la pieza objeto. En las zonas rampa y bulk, en esta imagen, parece que sólo hay elementos sólidos, pero las pieles están modeladas mediante elementos CQUAD4 revistiendo la cara útil y la cara bolsa del núcleo, modelado mediante los elementos sólidos.

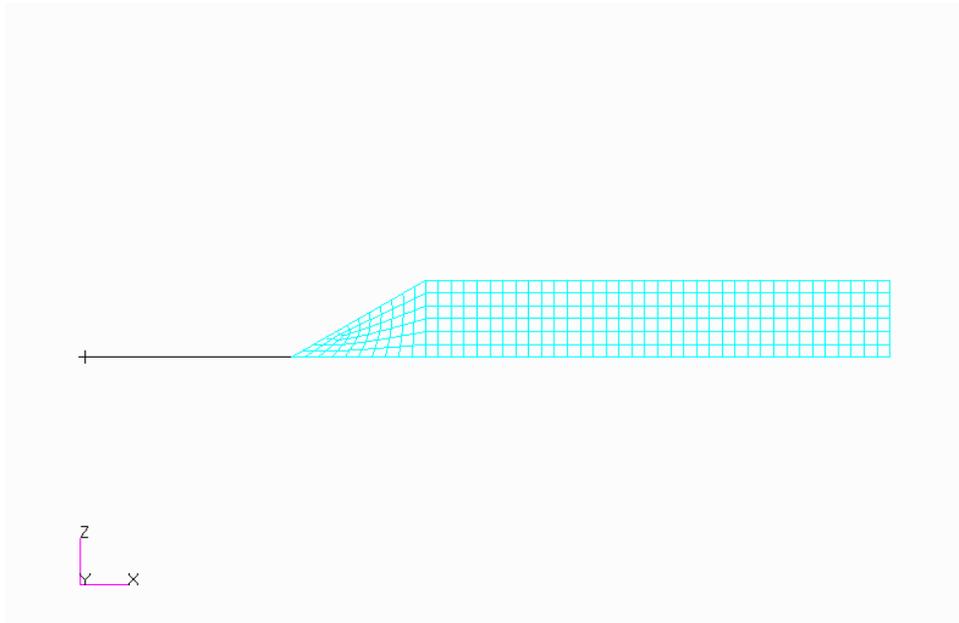


Figura 42. Vista xz de la malla de elementos finitos del panel sándwich modelado.

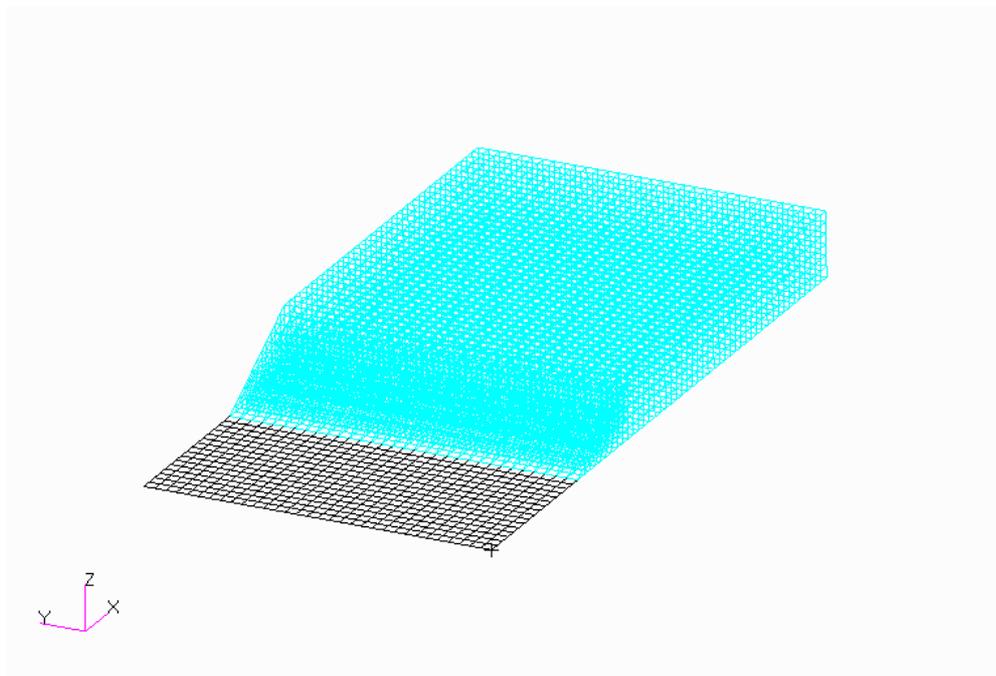
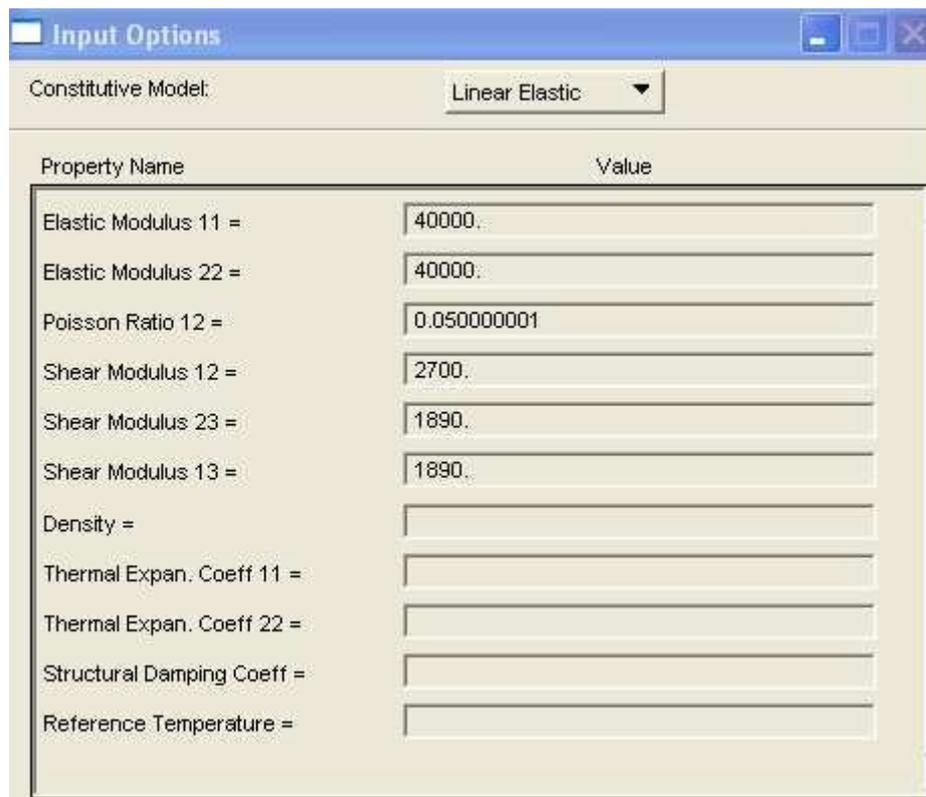


Figura 43. Perspectiva de la malla de elementos finitos del panel sándwich modelado.

5.5.3. MATERIALES

En el modelo pueden distinguirse dos materiales, el material del núcleo y el de las pieles.

Los laminados de las pieles están constituidos por láminas de un tejido de material compuesto de resina epoxi y fibras de carbono. Se define el material ortótropo 2D con las propiedades de rigidez de una lámina. Se ha considerado que E_{11} es igual que E_{22} , por ser un tejido, y se ha supuesto que las rigideces a cortadura fuera del plano son del orden de 0.7 la rigidez a cortadura en el plano.



Property Name	Value
Elastic Modulus 11 =	40000.
Elastic Modulus 22 =	40000.
Poisson Ratio 12 =	0.050000001
Shear Modulus 12 =	2700.
Shear Modulus 23 =	1890.
Shear Modulus 13 =	1890.
Density =	
Thermal Expan. Coeff 11 =	
Thermal Expan. Coeff 22 =	
Structural Damping Coeff =	
Reference Temperature =	

Figura 44. Propiedades de una lámina ortótropa de tejido compuesto de carbono-epoxi.

El material constitutivo del núcleo es un tipo de Nomex. Al sólido que modela el núcleo hay que darle las propiedades homogéneas ortótropas equivalentes.

Las propiedades del núcleo tipo “honeycomb” depende de la dirección del “ribbon”, también denominada dirección L, y la dirección perpendicular, denominada dirección del “expansion” o dirección W. En el análisis de elementos finitos se ha de tener en cuenta las direcciones L y W. En la siguiente imagen se define cuáles son estas direcciones.

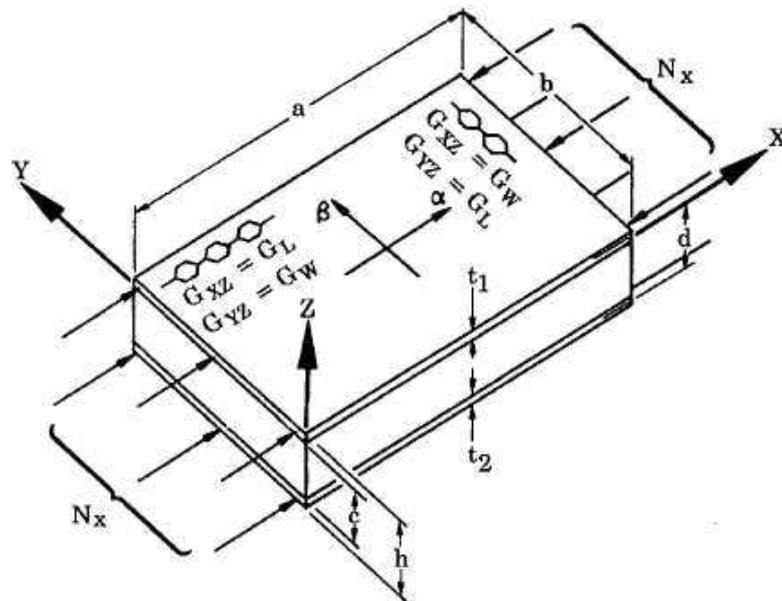


Figura 45. Propiedades del core según la orientación.

El core está orientado a 0° , lo que significa que:

- $G_{xz} = G_L$: módulo de cortadura en la dirección del “ribbon”
- $G_{yz} = G_W$: módulo de cortadura en la dirección del “expansion”

Se supone el core a 90° si la estructura “honeycomb” está girada con respecto al caso anterior. En este caso se tiene que:

- $G_{xz} = G_W$
- $G_{yz} = G_L$

Se define:

- $E_z = E_c$: módulo de compresión del core en dirección z

Las propiedades en el plano del núcleo “honeycomb” son muy bajas. Normalmente, se tienen en cuenta las siguientes consideraciones.

- Las rigideces en el plano son muy pequeñas. Deben tomarse para E_x , E_y , G_{xy} valores cercanos a 1, ya que tampoco se deben asignar valores muy pequeños para evitar singularidades en el cálculo numérico.
- El coeficiente de Poisson ν_{xy} tiene un efecto insignificante. Es recomendable usar valores inferiores a 1.

Los valores de las propiedades de rigidez empleados en el modelo del núcleo, teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, se muestran en el cuadro de diálogo que aparece en Patran cuando se define un material 3D ortótropo.

Property Name	Value
Elastic Modulus 11 =	1.
Elastic Modulus 22 =	1.
Elastic Modulus 33 =	120.
Poisson Ratio 12 =	0.30000001
Poisson Ratio 23 =	0.02
Poisson Ratio 31 =	0.02
Shear Modulus 12 =	1.
Shear Modulus 23 =	24.
Shear Modulus 31 =	60.
Density =	
Thermal Expan. Coeff 11 =	
Thermal Expan. Coeff 22 =	
Thermal Expan. Coeff 33 =	
Structural Damping Coeff =	
Reference Temperature =	

Figura 46. Propiedades homogéneas del Nomex honeycomb.

Por último, se definen las propiedades que caracterizan el laminado. Se define simplemente dando el material de cada lámina, su espesor y su orientación dentro del laminado. El material de cada lámina es el tejido definido anteriormente, y el espesor de cada una de ellas es de 0.26 mm. La orientación y el número de láminas dependen de la zona del panel sándwich, pista, rampa o bulk.

La secuencia de apilado hay que definirla en función del sentido de la normal de cada superficie. En la zona rampa y bulk las normales de las superficies van hacia fuera del panel, por lo que habrá que definir el laminado empezando por la lámina que está pegada al núcleo. Para la pista la normal va en dirección z positiva, por lo que habrá que definir el laminado empezando por la primera lámina de la cara útil.

En la siguiente imagen se puede observar un corte de la pieza, donde se pueden distinguir las distintas láminas que constituyen el laminado de cada una de las zonas, y donde se indican también las orientaciones de cada lámina. También se indican las dimensiones de la pista, rampa y bulk, así como el ángulo de rampa (30°) y la altura de core, H=15 mm.

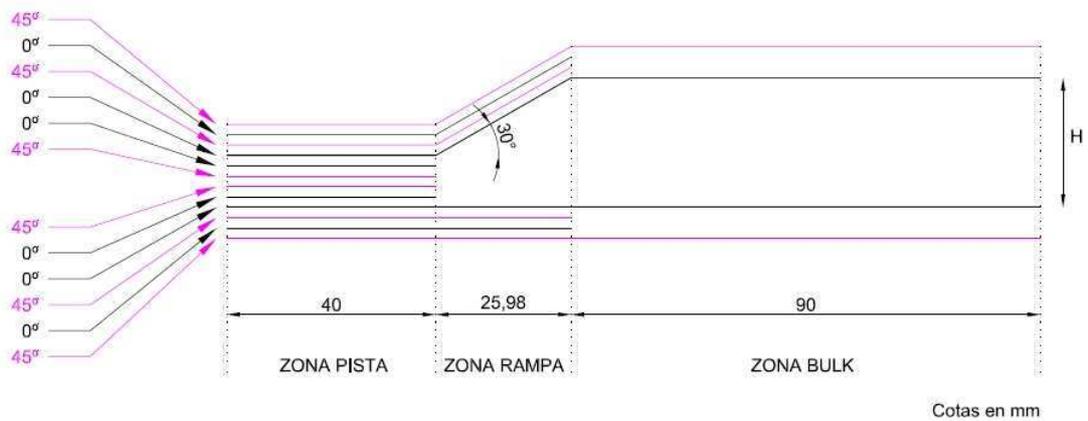


Figura 47. Características geométricas y del laminado que constituye cada una de las zonas del panel sándwich modelado.

El laminado de la pista se compone de 12 láminas con la siguiente secuencia de apilado: $[45^\circ 0^\circ 45^\circ 0^\circ 0^\circ 45^\circ]_S$.

Laminated Composite

Stacking Sequence Convention: Total

Offset: -1.5598999

Stacking Sequence Definition

	Material Name	Thickness	Orientation	Global Ply ID
1	M26T	2.600000E-1	4.500000E+1	
2	M26T	2.600000E-1	0.000000E+0	
3	M26T	2.600000E-1	4.500000E+1	
4	M26T	2.600000E-1	0.000000E+0	
5	M26T	2.600000E-1	0.000000E+0	
6	M26T	2.600000E-1	4.500000E+1	
7	M26T	2.600000E-1	4.500000E+1	
8	M26T	2.600000E-1	0.000000E+0	
9	M26T	2.600000E-1	0.000000E+0	
10	M26T	2.600000E-1	4.500000E+1	
11	M26T	2.600000E-1	0.000000E+0	
12	M26T	2.600000E-1	4.500000E+1	

Figura 48. Apilado de la pista.

El laminado de la rampa es el mismo para ambos revestimientos, $[45^\circ 0^\circ 45^\circ 0^\circ]$, por lo que hay que definir un solo laminado para la rampa.

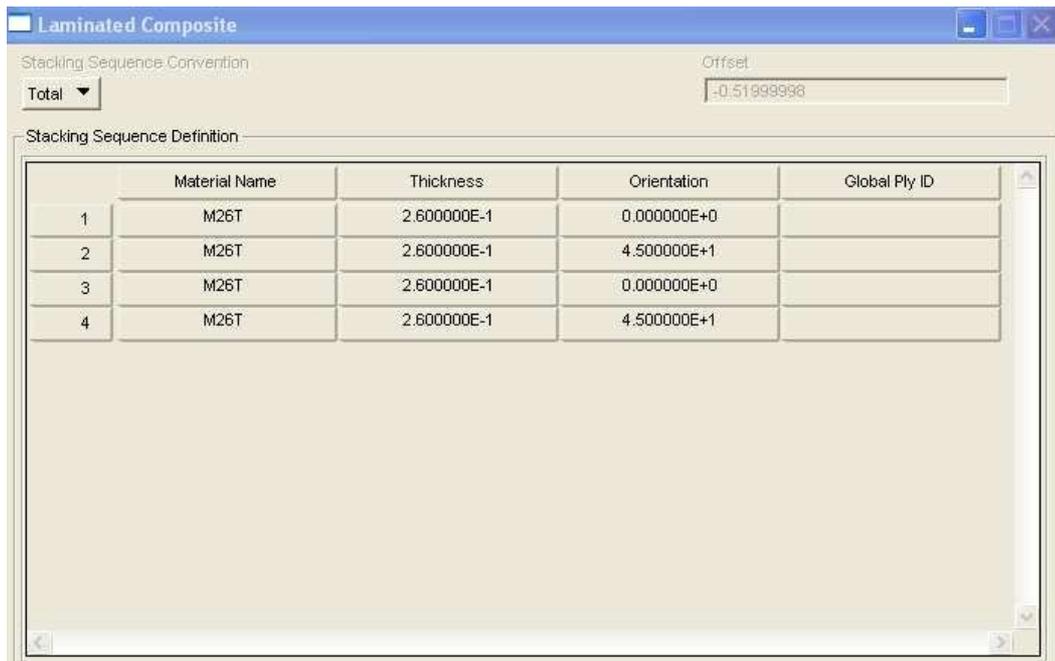


Figura 49. Apilado de cada una de las caras en la rampa.

En la zona bulk también se presenta el mismo laminado en la cara útil que en la cara bolsa, cuya secuencia de apilado es: $[45^\circ 0^\circ]$

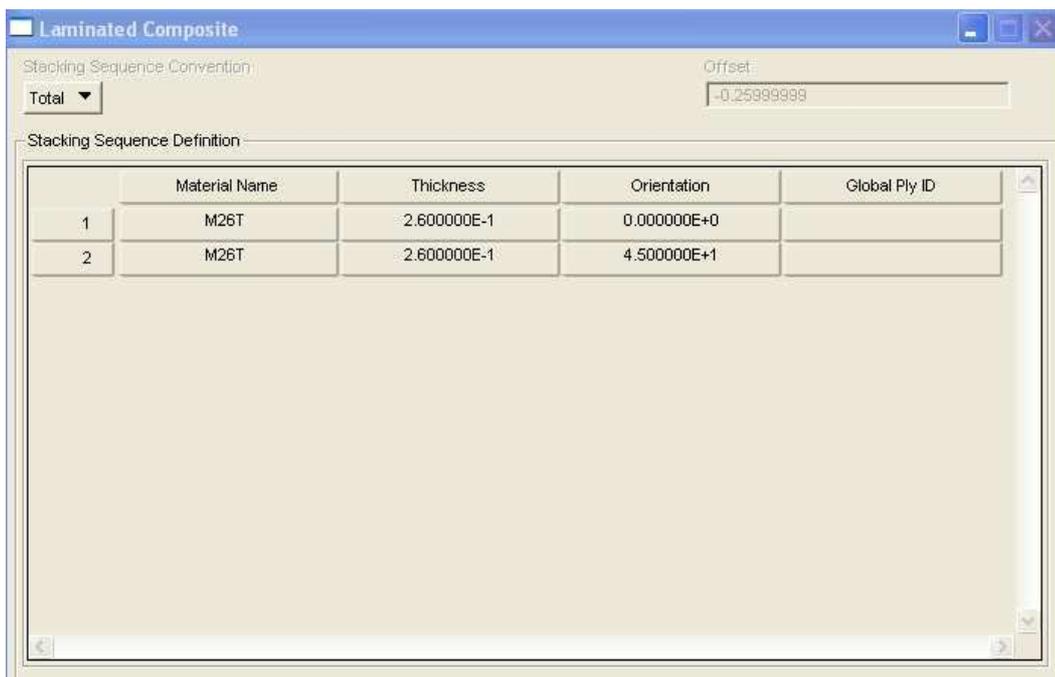


Figura 50. Apilado de cada una de las caras en la zona bulk.

Falta por comentar que a la zona de núcleo macizada, por donde se agarra la pieza al útil de ensayo, se le asignan las propiedades del potting empleado para el macizado de la pieza. El núcleo macizado se comporta como un material mucho más rígido e isótropo, cuyas propiedades son:

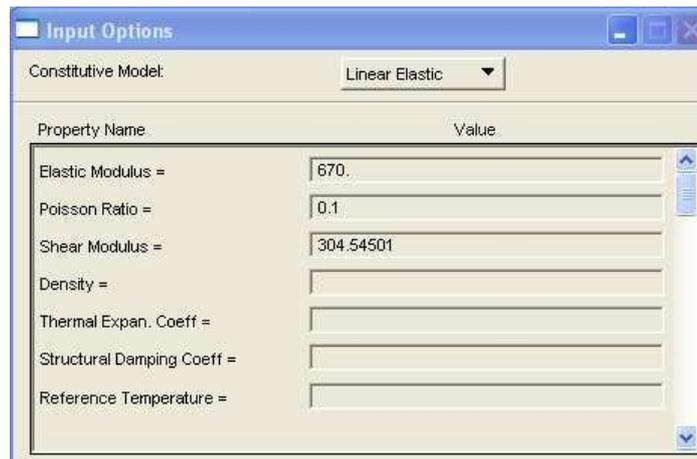


Figura 51. Propiedades del potting.

5.5.4. PROPIEDADES

Para definir completamente los elementos del modelo de elementos finitos se le aplican las propiedades de los materiales definidas en el apartado anterior y se les dan otras características adicionales.

La propiedad dada a los elementos que modelan los revestimientos es la CQUAD4/PCOMP, que define un elemento estándar de tipo lámina con las propiedades de un laminado. Tras elegir la propiedad de los elementos se les da también el material, definido anteriormente, y la orientación del mismo. Se le asigna la orientación 0° a la dirección paralela al eje x del sistema Coord0. Respecto a dicha dirección se toman las disposiciones angulares de las láminas del laminado.

A los elementos sólidos se les asigna la propiedad mediante la tarjeta PSOLID, mediante la cual se le da el material definido y la orientación del núcleo. Se le asigna la orientación 0° , por lo que se tiene que $G_{xz} = G_L$ y $G_{yz} = G_W$.

5.5.5. CONDICIONES DE CONTORNO

- CARGA

De los resultados de los ensayos, los cuáles se detallan en el capítulo posterior, se obtiene que la tensión de rotura es de unos 700 N. Se ha considerado ese valor como la carga del modelo, para la cual se analizarán los resultados deseados.

Se aplica, por tanto, una carga de 700 N en dirección z negativa, repartida en dos filas de nodos. El reparto considerado consiste en asignar a los nodos de los extremos de la pieza la mitad de carga que al resto. Se aclara a continuación el reparto de carga considerado.

Si la carga se supone aplicada en una línea de elementos el valor que le corresponde a cada elemento es:

$$\frac{700 \text{ N}}{32 \text{ eltos. ancho pista}} = 21.875 \text{ N / elemento}$$

Pero las cargas hay que aplicarlas en los nodos no en los elementos. En la siguiente imagen se puede visualizar como a los nodos intermedios (indicados con la letra I) le corresponde la carga aplicada a $4 \cdot \frac{1}{4}$ de elemento, es decir, 21.875 N. A los nodos de los extremos de la pieza (indicados con la letra E), sólo le corresponde la carga aplicada a $2 \cdot \frac{1}{4}$ de elemento, es decir, 10.9375 N.

La carga se aplica a unos 30 mm del comienzo de rampa. Se ha considerado aplicarla en dos líneas de nodos en lugar de una para que se asemeje un poco más a la realidad, ya que el aplicador de la carga en el ensayo tiene unas ciertas dimensiones, que hacen que la carga no esté aplicada en una línea.

Por tanto, si se reparte la carga en dos líneas de elementos, la carga que le corresponde a cada elemento es:

$$\frac{700 \text{ N}}{64 \text{ eltos. ancho pista}} = 10.9375 \text{ N / elemento}$$

Como la carga hay que aplicarla en los nodos, y a cada nodo le corresponde la carga aplicada a $4 \cdot \frac{1}{4}$ de elemento, para los intermedios, y $2 \cdot \frac{1}{4}$ de elemento para los extremos, a los nodos intermedios se le aplica 10.9375 N y a los extremos la mitad.

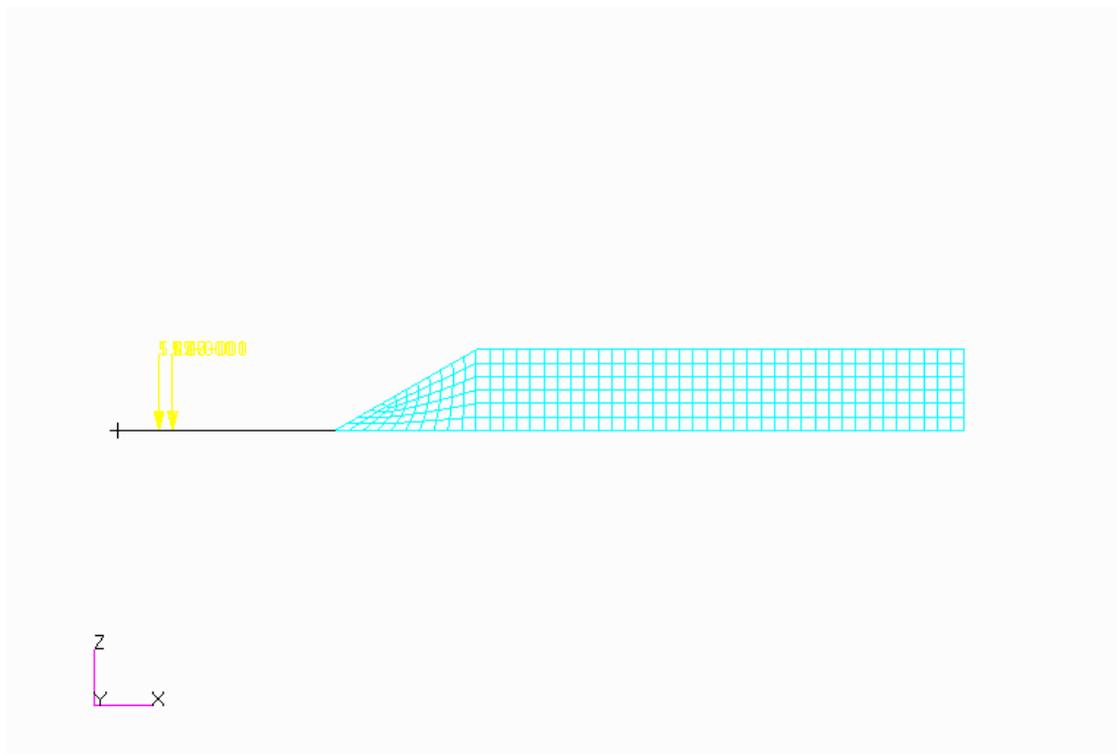


Figura 52. Vista xz del modelo de elementos finitos con carga aplicada.

Para comprobar que la carga aplicada es de 700 N se calculan las reacciones verticales que se obtienen al empotrar una línea de nodos. La suma de las reacciones en dichos nodos es de 700 N en dirección z positiva.

- **CONDICIONES DE CONTORNO EN DESPLAZAMIENTOS**

Las mordazas del útil de ensayo están en contacto con la pieza en la zona macizada. Estas mordazas no están del todo apretadas, es decir, no producen una condición de contorno de empotramiento, sólo impiden el desplazamiento vertical en aquellos nodos donde las reacciones no sean de tracción. Para aplicar esta condición de contorno se realiza un proceso iterativo en el cual los pasos a seguir son los siguientes: inicialmente se impide el desplazamiento vertical en todos los nodos de la pieza correspondientes a la zona macizada, se carga el modelo, se calculan las reacciones en los nodos, en aquellos nodos donde aparezcan reacciones de tracción deberá liberarse el desplazamiento impedido. Seguir tantas iteraciones hasta que ya no aparezcan reacciones de tracción. Los nodos que queden con reacciones de compresión son aquellos en los que realmente hay contacto entre la pieza y el útil de ensayo, por lo que únicamente en estos nodos se impedirá el desplazamiento vertical.

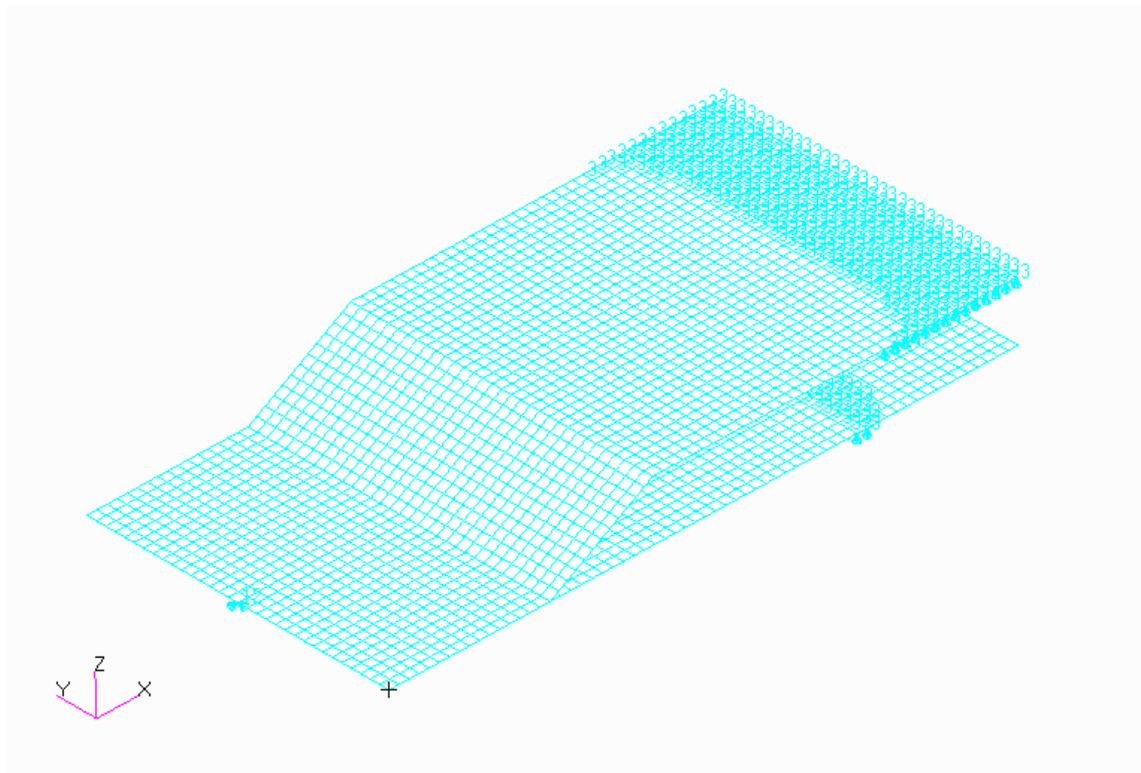


Figura 53. Condiciones de contorno en desplazamientos.

Como se puede visualizar en la imagen anterior, en la cara bolsa la probeta se despegó por el comienzo de la zona macizada y permanece en contacto al final de la pieza. En la cara útil ocurre lo contrario, la pieza se clava en las mordazas en la zona del comienzo del macizado y se despegó en el extremo de la pieza.

Para evitar movimientos como sólido rígido es necesario impedir desplazamientos en otros nodos. Hay varias posibilidades de hacerlo, en este caso se ha impedido el desplazamiento x en un nodo y el desplazamiento en y en dos adicionales.

5.6. ANÁLISIS DEL MODELO

Para finalizar el preproceso sólo queda seleccionar el tipo de análisis deseado. El problema se va a estudiar mediante un análisis lineal, aunque en capítulos posteriores también se comprobará la solución obtenida del análisis no lineal.

El análisis lineal (Linear Static) se caracteriza principalmente por resolver con la hipótesis de pequeñas deformaciones.

El análisis no lineal (Nonlinear Static) resuelve en grandes desplazamientos, el procedimiento que sigue es dividir la carga aplicada en un número de intervalos y resolver en cada paso sobre la deformada del intervalo anterior, para ello utiliza el método de Newton-Raphson en cada paso de carga.

Antes de resolver el modelo hay que seleccionar las variables que se desean obtener en el análisis, en este proyecto se calculan las tensiones, deformaciones, desplazamientos, reacciones y fuerzas en las láminas. En el caso del análisis no lineal además se permite la obtención de estos resultados en cada uno de los sub-pasos de carga que se llevan a cabo para obtener la solución.

Con esto se acaba el preproceso, para resolver el modelo se utiliza el programa MSC. Nastran que da lugar a una serie de archivos entre los que están los resultados.

5.7. RESULTADOS

Para poder visualizar los resultados que Nastran ha obtenido es necesario cargar en Patran uno de los archivos que se generan, el archivo de extensión xdb (o el de extensión op2).

Después Patran actúa como postprocesador permitiendo visualizar los resultados deseados de muy distintas formas. En los siguientes capítulos se utiliza este postprocesador para ir obteniendo los resultados del proyecto.