

CAPÍTULO N°2: ESTRUCTURAS TIPO SÁNDWICH

- 2.1. INTRODUCCIÓN**
- 2.2. COMPONENTES DE UNA ESTRUCTURA SÁNDWICH**
- 2.3. CARACTERÍSTICAS DE UN PANEL SÁNDWICH**
- 2.4. COMPORTAMIENTO DE UN PANEL SÁNDWICH**
- 2.5. HIPÓTESIS DE ANÁLISIS EN PANELES SÁNDWICH**

2.1. INTRODUCCIÓN

Una estructura sándwich consiste, en su forma más simple, en dos placas relativamente delgadas de laminado sólido, pegadas y separadas por un núcleo ligero mucho más grueso que las anteriores.

Los paneles sándwich pueden ser construidos de una gran variedad de formas y con una gran variedad de materiales, pero la mayoría de las estructuras sándwich empleadas en construcciones aeronáuticas están fabricadas con láminas de material compuesto de fibra de carbono, que forman las caras que se unen al núcleo.

El análisis estructural del presente documento se va a centrar en un panel sándwich con núcleo tipo "honeycomb", con los bordes biselados y las caras constituidas por un material ortótropo, como el que se muestra en la Figura 4.

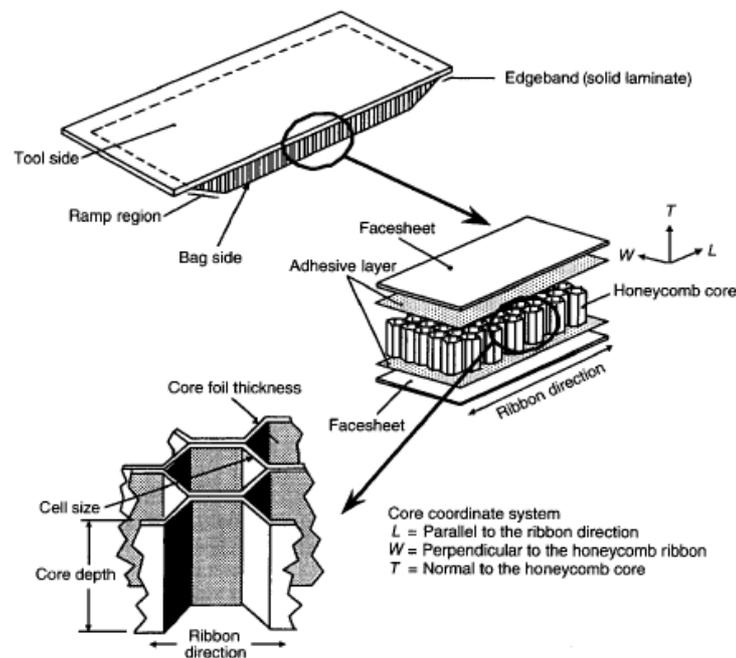


Figura 4. Esquema de panel sándwich con núcleo nido de abeja

La cara plana se denomina cara útil, y la opuesta se denomina cara bolsa. Ésta denominación se la deben al proceso de fabricación mediante bolsa de vacío, donde la cara útil es la que apoya en el útil de fabricación, y la cara bolsa es la que está en contacto con la bolsa de vacío.

La cara bolsa sigue el contorno del núcleo, formando una pendiente hasta que termina el núcleo y se encuentra con la cara útil. La parte del panel que está inclinada se denomina rampa, la región donde se unen cara útil y cara bolsa se denomina pista, y la zona donde el núcleo tiene espesor constante se llama zona bulk.

2.2. COMPONENTES DE UNA ESTRUCTURA SÁNDWICH

Como se ha comentado anteriormente, las estructuras tipo sándwich están formadas por dos láminas delgadas o pieles que encierran al núcleo. Esquemáticamente, se muestra la configuración de este tipo de materiales en la siguiente figura, donde sólo se representa la zona bulk de un panel sándwich

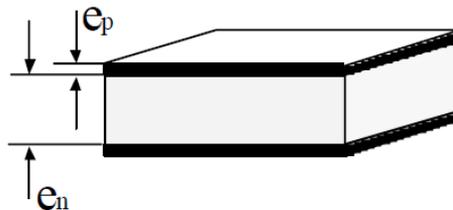


Figura 5. Esquema de una estructura tipo sándwich

Donde:

- e_p : espesor de la piel
- e_n : espesor del núcleo
- e_a : espesor del adhesivo (unión entre piel y núcleo)
- ρ_n : Densidad del núcleo

Los valores geométricos característicos, así como el intervalo para los valores típicos densidad del núcleo, de este tipo de materiales son:

- $10 \leq e_n/e_p \leq 100$
- $0.25\text{mm} \leq e_p \leq 12.7\text{mm}$
- $20\text{kg/m}^3 \leq \rho_n \leq 1000\text{kg/m}^3$
- $0.025\text{mm} \leq e_a \leq 0.2\text{mm}$

A continuación se describen las principales características de los tres componentes que constituyen un panel sándwich de los empleados en la industria aeronáutica.

2.2.1. PIELES

Los revestimientos o pieles se definen como los laminados de material compuesto que encierran al núcleo en un sándwich. Asimismo, un material compuesto se puede describir como la unión de una resina, que constituye la matriz, con otro material más resistente, las fibras. De forma esquemática:

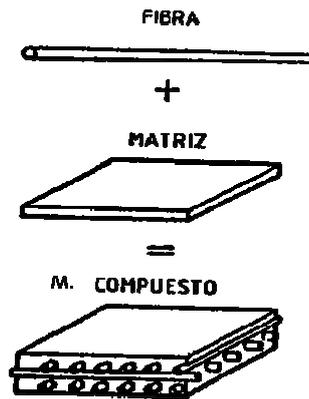


Figura 6. Material compuesto

Se suele definir el material compuesto como la combinación a escala macroscópica de dos o más materiales con interfases de separación entre ellos para formar un nuevo material.

En la siguiente figura se presenta una clasificación de los materiales compuestos.

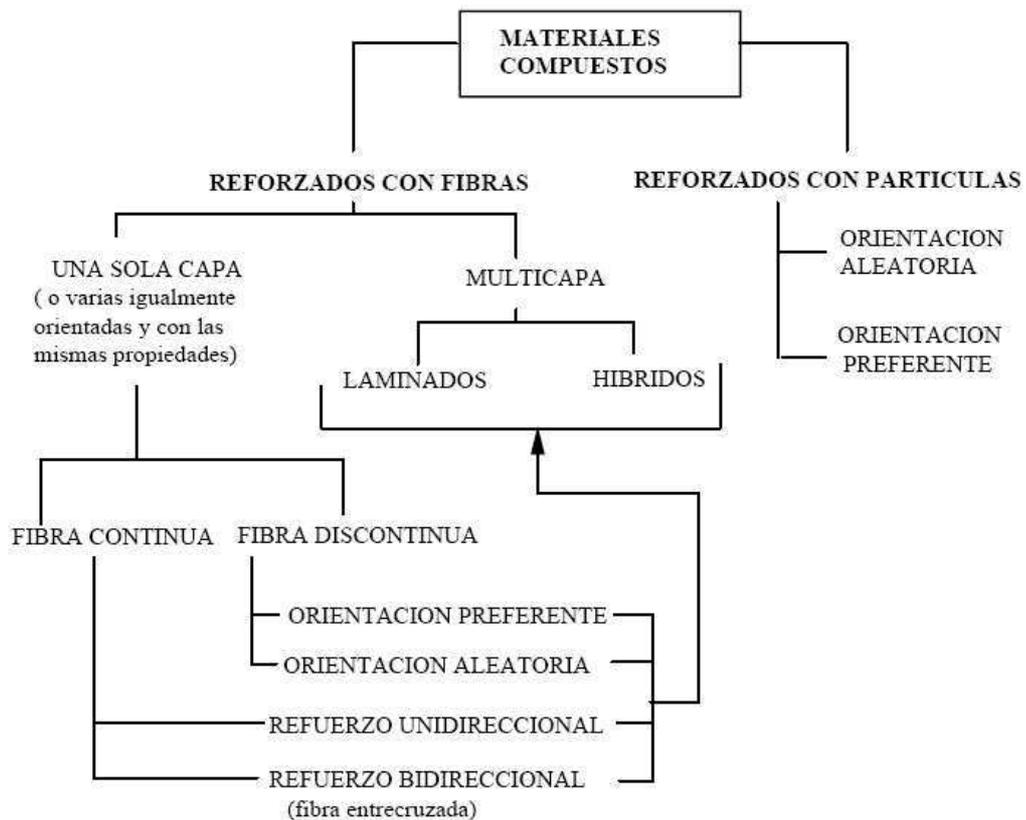


Figura 7. Clasificación materiales compuestos.

Los materiales compuestos se suministran en forma de rollos de material preimpregnado (fibra impregnada en matriz), de pesos, anchuras y espesores variables.

Este proyecto se centra en el estudio de paneles sándwich, cuyas pieles están constituidas de material compuesto reforzado con fibras en dos direcciones. A estas láminas con refuerzo bidireccional entrelazados en direcciones perpendiculares se les denomina tejidos. Las propiedades mecánicas vienen determinadas por las direcciones de los refuerzos, trama y urdimbre. La trama es perpendicular al borde longitudinal del preimpregnado, mientras que la urdimbre es paralela al mismo.

En la Figura 8 se presenta un rollo de material compuesto tejido, donde se puede observar que la fibra que va en la dirección de la trama permanece recta en el plano, mientras que la que va en la dirección de la urdimbre es la que va entrelazándose, y por tanto se curva.

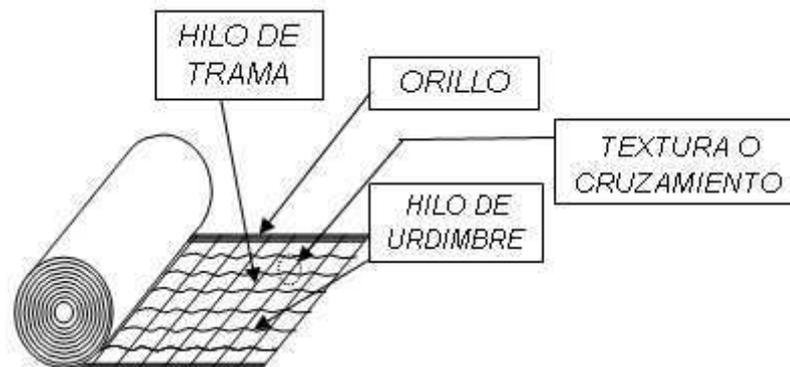


Figura 8. Rollo de tejido

Las propiedades mecánicas de un tejido vienen definidas por las direcciones de trama y urdimbre, y normalmente son más bajas que las de un preimpregnado tipo cinta en la dirección de las fibras, en los cuáles las fibras van en una sola dirección. Los tejidos son más fáciles de trabajar que las cintas, sobre todo en estructuras complejas con curvaturas complicadas.

En los materiales de fibra continua la carga es soportada fundamentalmente por las fibras, siendo la principal función de la matriz el mantener unidas a las fibras y protegerlas. El modo de fallo en estos compuestos viene gobernado por las fibras, salvo para fracciones volumétricas de fibra muy bajas.

Las fibras más usadas son las de carbono, vidrio, boro (en menor medida) y las orgánicas (registradas como Kevlar). Para la matriz se suele emplear resinas epoxi y poliéster. Este estudio se centrará en tejidos de fibras de carbono y resina epoxi.

Las características que suelen ser de interés en los materiales compuestos son:

- Alta resistencia específica
- Alta rigidez específica
- Baja densidad
- No conductores eléctricos

- Resistentes a la corrosión
- Larga vida a fatiga
- Amortiguan vibraciones
- Aislamiento térmico y acústico
- Resistencia a la abrasión
- Posibilidad de diseñar y modificar las propiedades mecánicas en base a su anisotropía

Como inconvenientes se puede hacer mención a:

- Elevado coste del material
- Alta sensibilidad de las propiedades mecánicas ante variaciones de temperatura y humedad
 - Procesos de fabricación tecnológicamente complejos
 - Equipos e instalaciones de fabricación de elevado coste
 - Posibilidad de inducir corrosión galvánica en contacto con materiales metálicos
- Elevado esfuerzo en procesos de control de procesos
- Vida limitada antes de la polimerización

2.2.2. NÚCLEO

El núcleo se puede definir como aquel elemento de baja densidad y bajas características mecánicas que separa los revestimientos en una estructura sándwich. Suele denominarse núcleo o core.

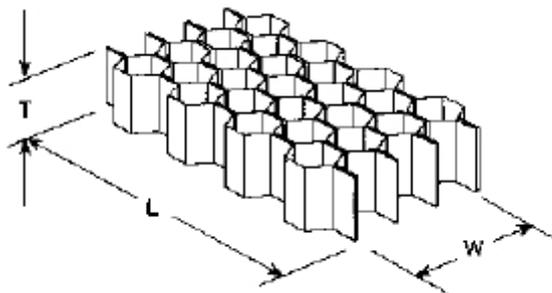


Figura 9. Núcleo honeycomb con celdilla hexagonal.

En cuanto al tipo de material utilizado en el núcleo, se distinguen dos grandes grupos: Los tipo panal de abeja (“honeycomb”), que suelen ser de Aluminio, Nylon o Nomex, y los de material sintético (espuma).

Los elementos y parámetros que caracterizan a los núcleos tipo “honeycomb” son:

- CELDILLA: Figura geométrica que se repite a lo largo y ancho del núcleo.

- 1) Hexagonal
- 2) Rectangular
- 3) Trébol o seta

En la Tabla 1 se puede observar la geometría de cada tipo de celdilla.

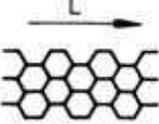
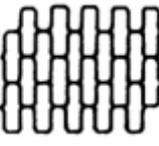
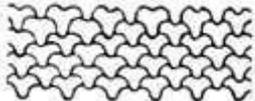
CONFIGURACIÓN	DENOMINACIÓN	APLICACIÓN
	HEXAGONAL	Es la más utilizada. Se puede fabricar por expansión y por ondulación.
	RECTANGULAR	Se fabrica sometiendo al hexagonal a una sobre-expansión en la dirección perpendicular a las superficies pegadas.
	Seta (Flex-Core)	Configuración extremadamente flexible, que puede acoplarse con facilidad a formas complejas

Tabla 1. Tipología de celdillas de núcleos honeycomb.

- NODO: Zona de pegado entre celdilla
- ESPESOR DE PARED: Espesor de la hoja que forma la celdilla
- DIRECCIÓN LONGITUDINAL: Dirección perpendicular al sentido de expansión del núcleo o la línea recta paralela a los nodos (se denomina ribbon y se representa con la letra L).
 - DIÁMETRO: Distancia entre lados opuestos de una celdilla o diámetro del círculo inscrito en una celdilla.
 - ALTURA: Distancia entre las caras externas del núcleo.
 - DENSIDAD: Parámetro que depende del espesor de hoja, del material y diámetro de la celdilla.

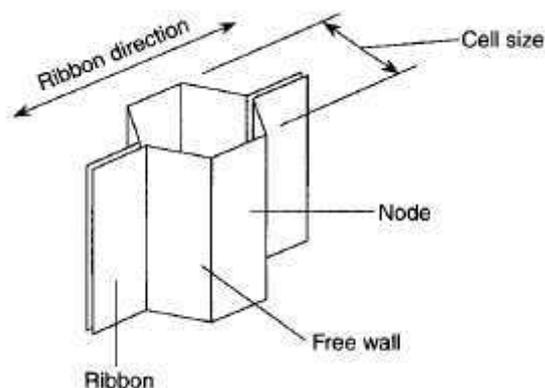


Figura 10. Celdilla hexagonal de una estructura honeycomb.

Los núcleos tipo “honeycomb” presentan las siguientes características:

- Soportan cargas a compresión y a tracción.
- Tienen excelente rigidez y resistencia específica.
- Bajo peso.
- Tiempo y coste de fabricación reducidos.
- Se utilizan en zonas donde no se requieran grandes solicitaciones mecánicas (Puertas, trampas, superficies de control, panza del avión...).

2.2.3. ADHESIVO

Con el fin de unir la piel al núcleo se suele colocar una capa de adhesivo entre ellos.

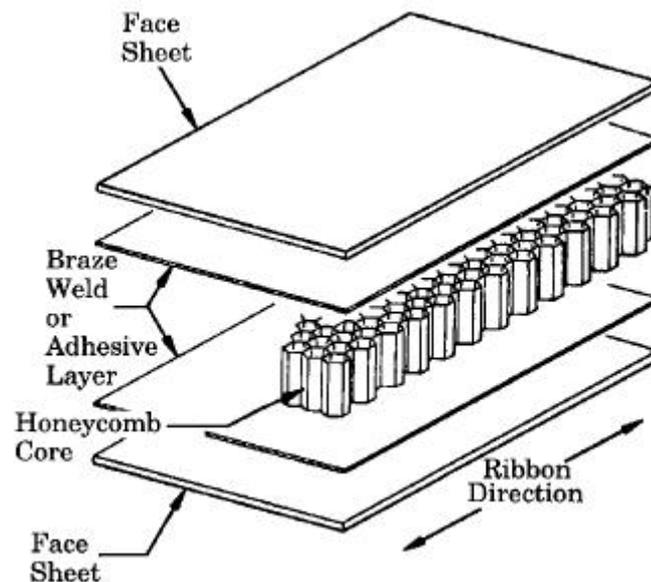


Figura 11. Componentes de una estructura sándwich.

Dependiendo del procedimiento que se emplee para la fabricación del sándwich se suele utilizar un film de adhesivo o no. Si se lleva a cabo un procedimiento de precurado, en el cual se forman los empilados de fibra en una primera fase y después se unen al núcleo, es necesario emplear una capa de adhesivo entre cada revestimiento y el núcleo. En cambio, si se fabrica mediante cocurado no es necesario emplear una capa de adhesivo, ya que la resina de las láminas de fibra puede actuar como medio de unión entre los revestimientos y el núcleo.

2.3. CARACTERÍSTICAS DE UN PANEL SÁNDWICH

El material del núcleo se elige para aligerar el peso de la estructura, y debe ser compatible con el material de las láminas de los revestimientos, y con los métodos de fabricación usados para unir las caras al núcleo. Si se eligen los materiales del núcleo y de las caras de forma apropiada, se pueden conseguir relaciones de rigidez y resistencia frente al peso mayores de las que se pueden alcanzar con otros tipos de estructuras.

Este tipo de construcción permite obtener elevados valores de rigidez a flexión con un peso mínimo, en comparación con los laminados monolíticos. En la mayoría de los casos, la principal razón por la que se usan las estructuras tipo sándwich es por el ahorro de peso, pero también aportan otras ventajas.

En la selección de este tipo de estructuras frente a las monolíticas se deben considerar las complicaciones de fabricación derivadas, que pueden hacer aumentar los costes por encima de las construcciones monolíticas.

Entre las características más destacadas de estos materiales, de cara a su aplicación en la industria aeronáutica, cabe citar las siguientes:

- Bajo peso. Permite excelentes comportamientos en estructuras de placas reduciendo el peso de material debido a la introducción del núcleo.
- Rigidez a flexión. Para ilustrar este aspecto, en la Tabla 2 se muestra una comparación entre la rigidez a flexión, resistencia y peso de varias configuraciones estructurales para una placa. La primera, de izquierda a derecha, que además es la que se toma como referencia asignando un valor unidad a las propiedades anteriormente enumeradas, corresponde a una placa metálica de espesor t . En la segunda, las pieles son metálicas y el espesor total es $2t$. Lo mismo ocurre con la tercera configuración sólo que, ahora, el espesor es $4t$.

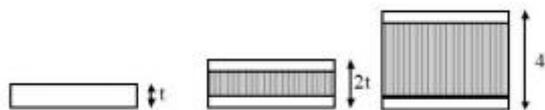


Figura 12. Comparación de estructuras respecto a la rigidez a flexión

Espesor núcleo	0	t	$3 \cdot t$
Rigidez a flexión	1	7	37
Resistencia	1	3,5	9,25
Peso	1	1,03	1,06

Tabla 2. Efecto del espesor del núcleo en la rigidez, resistencia a flexión y en el peso de la estructura

De la comparación entre los valores de la tabla anterior se desprende que, sin prácticamente aumento de peso, la rigidez a flexión se incrementa considerablemente en las soluciones segunda y tercera respecto de la primera, sucediendo lo mismo con la resistencia.

- Posibilidad de obtener propiedades de aislamiento acústico y térmico.

Las características menos favorables derivadas de la utilización de este tipo de materiales son:

- Mala resistencia al fuego de determinados materiales que se utilizan como núcleo. Los riesgos de fuego son más elevados que cuando se utilizan materiales estructurales clásicos.
 - Punzonamiento o hundimiento local. Es sensible a cargas de impacto, se produce fallo del núcleo a compresión cuando los revestimientos son muy delgados.
 - Baja hermeticidad frente al agua, lo que puede provocar la degradación del adhesivo y posteriormente del núcleo. Se suele dar debido al pequeño espesor del laminado que constituyen los revestimientos en la zona bulk.

Una estructura sándwich presenta buen comportamiento a fatiga, debido a que las caras están unidas de forma continua al núcleo, lo que hace que las tensiones residuales sean mínimas.

En las estructuras sándwich con núcleo tipo “honeycomb” (nido de abeja) las caras no están continuamente apoyadas en el núcleo. Cada celda del “honeycomb” deja una porción de cada una de las caras de la estructura sin apoyar, y debe constituir un parámetro crítico en el diseño de una estructura sándwich, dependiendo de la geometría de la celda y de las propiedades de las caras.

En cuanto a la fabricación de las estructuras sándwich, los revestimientos se pueden curar separadamente y pegar posteriormente al núcleo, co-curar con el núcleo en una única operación o se pueden combinar ambos métodos. El primer tipo de procedimiento asegura un buen acabado superficial de los revestimientos pero puede presentar problemas de ajuste entre los revestimientos y el núcleo. El segundo tipo de procedimiento, por el contrario, suele presentar un pobre acabado superficial aunque el ajuste con el núcleo es mucho mejor. El acabado superficial se puede mejorar utilizando un segundo revestimiento cocurado con el primero o curado en un ciclo posterior. Los revestimientos cocurados suelen presentar peores propiedades mecánicas.

2.4. COMPORTAMIENTO DE UN PANEL SÁNDWICH

En este tipo de estructuras las caras de material compuesto resisten casi todas las cargas en el plano y los momentos de flexión fuera del plano, proporcionan casi toda la rigidez a flexión porque tienen un módulo de elasticidad más alto que el del núcleo, y están situadas a una mayor distancia del eje neutro de la estructura. El núcleo proporciona distancia entre las caras y les transmite el cortante como una flexión alrededor del eje neutro de la estructura. El núcleo también suministra la rigidez a cortante a través del espesor y estabiliza las cargas en las caras, así las caras se pueden cargar a niveles de tensión más altos que los que puede soportar cualquier placa delgada sometida a cargas de pandeo.

La idea básica que permite entender la funcionalidad, en cuanto a resistencia mecánica en este tipo de estructuras, es que al separar los revestimientos se consigue aumentar la rigidez a flexión. Los revestimientos actúan de forma similar a las alas de una viga en I, soportando las cargas de flexión mediante tracción del ala inferior y compresión del ala superior (suponiendo una carga de flexión que tracciona el ala inferior y comprime el superior). El núcleo hace una función similar al alma de la viga, resistiendo las cargas de cortadura transversal.

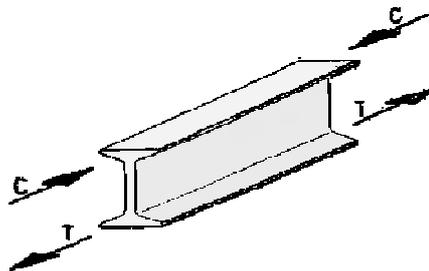


Figura 13. Símil al comportamiento de una viga

Por tanto, las siguientes hipótesis son las tenidas en cuenta en las estructuras sándwich en cuanto al comportamiento mecánico:

- Los revestimientos resisten todas las cargas en el plano y los momentos flectores.
- El núcleo separa los revestimientos y transmite cortadura entre ambos de manera que se pueden considerar efectivos respecto de un eje neutro común. Otra misión del núcleo es evitar que los revestimientos pandeen por separado.
- Las cargas fuera del plano se suponen reaccionadas por el núcleo.

Aunque la rigidez a flexión se ve incrementada significativamente con respecto a una construcción monolítica con el mismo peso, no ocurre lo mismo con la rigidez plana y la resistencia.

2.5. HIPÓTESIS DE ANÁLISIS EN PANELES SÁNDWICH

Para el cálculo estructural de paneles tipo sándwich se suelen realizar las siguientes hipótesis.

- La rigidez en el plano del núcleo es despreciable frente a la rigidez en el plano de las pieles:

$$E_{xcore}=E_{ycore}=G_{xycore}=0$$

- El centroide del panel en zona bulk coincide con el centroide de las pieles.

- Las pieles son delgadas y su inercia respecto de su centroide es nula.

$$t_i^3 = t_b^3 = 0$$

- En zona bulk, las cargas de cortadura fuera del plano son soportadas únicamente por el core y se distribuyen uniformemente en su espesor.

Las hipótesis que aquí se presentan simplifican de manera considerable el cálculo analítico de paneles. No son necesarias en el análisis con elementos finitos, pero son muy útiles para entender el comportamiento mecánico de este tipo de estructuras.