

CAPÍTULO 7

INTRODUCCIÓN A LAS ESTRUCTURAS SANDWICH

7.1. MATERIALES COMPUESTOS TIPO SANDWICH

7.1.1 INTRODUCCIÓN

Debido a la importancia de este tipo de materiales en las industrias aeroespacial, de construcción, etc., se les concede, en este texto, un tratamiento más detallado. Las primeras estructuras de materiales compuestos fueron tipo "sandwich", y se obtenían ensamblando por pegado (o soldadura) dos láminas delgadas y de alta resistencia, denominadas pieles, y una placa gruesa de material ligero, denominada núcleo, de bajas características mecánicas. Esquemáticamente, se muestra la configuración de este tipo de materiales en la figura 7.1.

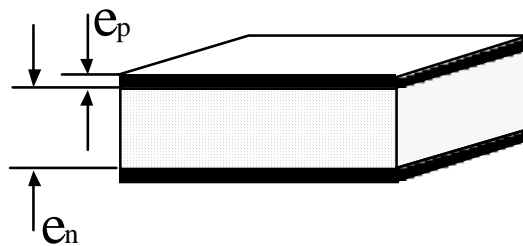


Figura 7.1. Esquema de una estructura tipo sandwich

Los valores geométricos característicos, así como también el intervalo de su densidad, de este tipo de materiales son:

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

donde:

- e_p = Espesor de la piel
- e_n = Espesor del núcleo
- e_a = Espesor del adhesivo
- γ_n = Densidad del núcleo

Entre las **características más favorables** de estos materiales de cara a su aplicación, caben citar las siguientes:

a) Ligereza. Así, por ejemplo, la cúpula de San Pedro en Roma, realizada a base de piedra, tiene una densidad areal de 2600 kg/m^2 . Si se hubiese utilizado material compuesto tipo sandwich -cosa imposible por la época en que se construyó- a base de acero en las pieles junto con un núcleo de espuma de poliuretano, la densidad areal resultante hubiera sido de 33 kg/m^2 .

b) Rigidez a flexión. Para ilustrar este aspecto, en la Figura 7.2 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 de aluminio de espesor t . En la segunda, las pieles son de aluminio y el espesor total es $2t$. Lo mismo ocurre con la tercera configuración sólo que, ahora, el espesor es $4t$.

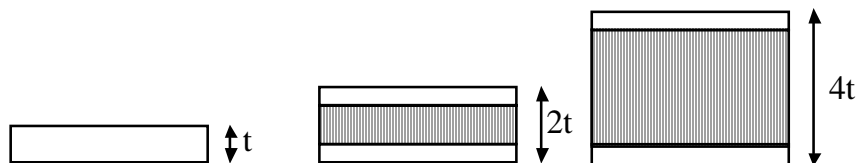


Figura 7.2

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

Tabla 7.1. Efecto del espesor del núcleo en la rigidez y 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.

c) Aislamiento térmico. Veamos la gran capacidad aislante de los materiales tipo sandwich con un ejemplo. Para ello es necesario recordar la ley de básica de propagación del calor por conducción a través de una pared compuesta de área A . Llamando \dot{Q} al flujo de calor por unidad de tiempo, T_1 y T_2 las temperaturas en ambas caras de la pared, e_i a los espesores de cada pared y k_i a sus respectivos coeficientes de conductividad térmica, la relación básica resultante es:

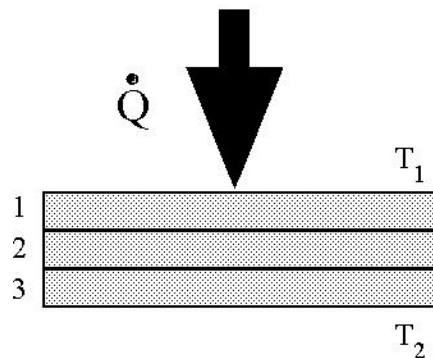


Figura 7.3

$$\dot{Q} = A \cdot \frac{T_1 - T_2}{\sum \frac{e_i}{k_i}} \quad [7.1]$$

Así, por ejemplo, para

$$A = 1 \text{ m}^2, \quad T_1 - T_2 = 20^\circ\text{C}, \quad k_{\text{metal}} = 100 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}}, \quad k_{\text{n.a.poli}} = 0.07 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}}$$

y comparando una placa metálica, de 2 mm de espesor y un panel tipo sandwich de 7 mm de espesor, tal como se ha representado en la figura Figura 7.4:

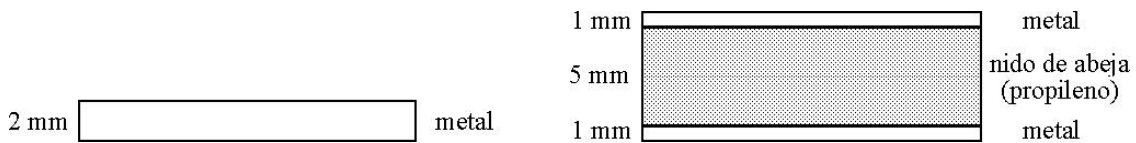


Figura 7.4

Las potencias caloríficas que se transmitirían serían de 1 Mw para la placa metálica y de 300 w para la placa sándwich, lo que demuestra la capacidad de aislamiento térmico que ofrecen estos materiales tipo sandwich.

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

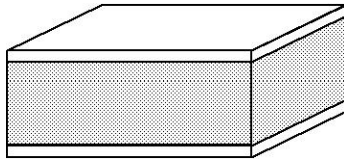
- Mal aislamiento acústico.
- Mala resistencia al fuego de determinados materiales que se utilizan como núcleo.
- Los riesgos de fuego son más elevados que cuando se utilizan materiales estructurales clásicos.

7.1.2 SELECCIÓN DE MATERIALES

A continuación se muestra una tabla en la que se recogen los materiales más utilizados para pieles y para núcleos, así como sus disposiciones dentro del panel tipo sandwich:

| | PIELES | NÚCLEOS |
|--|---------------|----------------|
|--|---------------|----------------|

Expandido



Metales

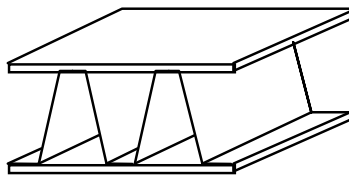
Laminados

Contrachapados
termoplásticos*

Espuma de
poliuretano

Espuma de
poliestireno*

Placa nervada



amianto/cemento

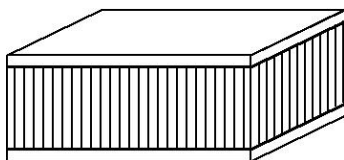
Metales

Laminados

Metal

Material compuesto.

Nido de abeja



Contrachapados

Laminados

Aluminio

Madera

Nido de abeja de
cartón

Nido de abeja de
Aluminio

*NOTA IMPORTANTE: Las resinas poliésteres atacan a las espumas de poliestireno.

Tabla 7.2. Materiales más utilizados en la fabricación de pieles y núcleos

7.2. COMPORTAMIENTO MECÁNICO

Para entender la forma de trabajo de un panel tipo sandwich es necesario diferenciar las formas de trabajo de las pieles y el núcleo. Las pieles soportan las cargas inducidas por la flexión y el núcleo el esfuerzo cortante que actúa sobre el panel. Es decir, las pieles trabajan como laminados solicitados por cargas en su plano, soportando el momento flector que aparece sobre el panel. Para comprender mejor el comportamiento de un panel sandwich, aunque esto se desarrollará con más profundidad posteriormente, considérese una viga en voladizo, como la indicada en la Figura 7.5, sometida a una carga por unidad de longitud perpendicular al plano del panel de valor P . Como se observa en la figura, en una sección genérica de la viga, el momento flector será $P \cdot x$ y el esfuerzo cortante P .

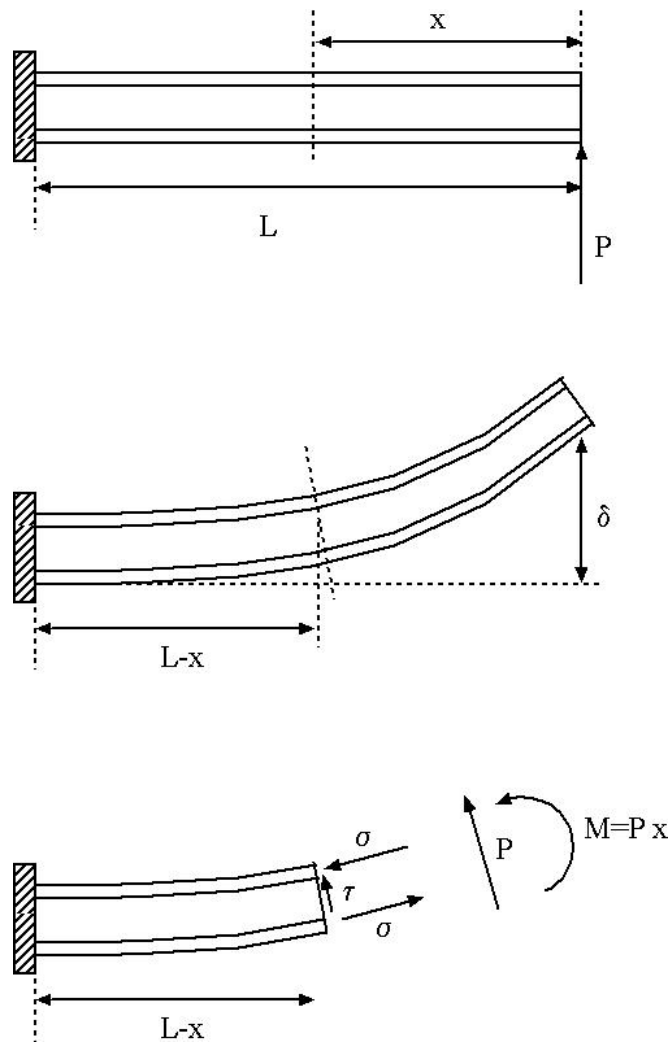


Figura 7.5

Las pieles trabajan en su plano sometidas a compresión -la piel superior- y a tracción la inferior. La tensión σ se considera constante a través del espesor de la piel y no se producen estados de cizalladura fuera del plano de la misma (Figura 7.6). El núcleo trabaja a cortante: no sufre ninguna deformación por flexión. Adicionalmente se supone que, la tensión tangencial τ , es constante a través del espesor del núcleo. Los valores de las tensiones σ y τ pueden calcularse, en función de los esfuerzos que parecen, como:

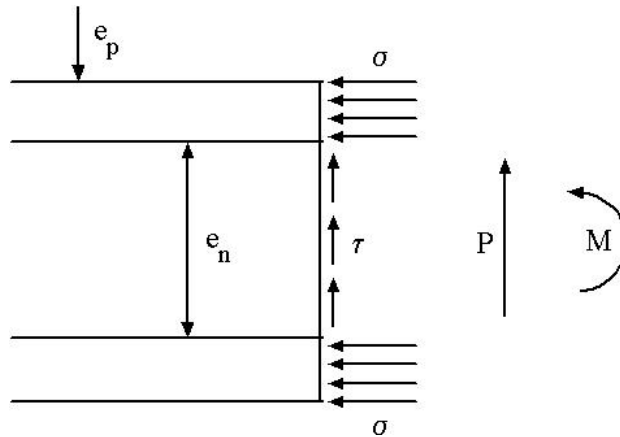


Figura 7.6

$$\sigma = \frac{M}{e_p \cdot e_n} \quad [7.2]$$

$$\tau = \frac{P}{e_n} \quad [7.3]$$

El cálculo de δ (flecha de la viga en ménsula) se puede hacer utilizando las fórmulas de Resistencia de Materiales haciendo las siguientes equivalencias:

$$E \cdot I \rightsquigarrow E_p \cdot e_p \cdot \frac{(e_n + e_p)^2}{2} \quad [7.4]$$

$$G \cdot \Omega \rightsquigarrow G_n \cdot (e_n + 2 \cdot e_p) \quad [7.5]$$

Donde:

- E_p = Módulo de elasticidad de las pieles
- G_n = Módulo de elasticidad a cortadura del núcleo
- σ = Tensión normal en la piel
- τ = Tensión de cortadura en el núcleo
- M = Momento flector
- P = Carga aplicada

- $E \cdot I$ = Rigidez a flexión equivalente de la viga
- $G \cdot \Omega$ = Rigidez a cortante equivalente de la viga

A continuación se muestra un ejemplo de aplicación que ilustra todo lo anterior

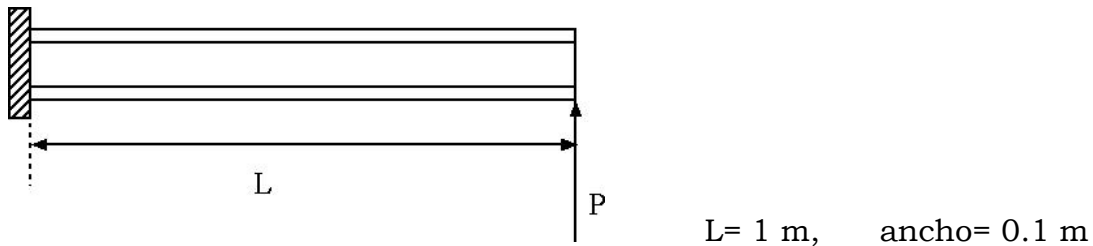


Figura 7.7

Piel:(Aluminio)

$$e_p = 2.15 \text{ mm}, \quad E_p = 65200 \text{ MPa}, \quad G_p = 24.890 \text{ MPa}$$

Núcleo(Espuma poliuretano)

$$e_n = 80 \text{ mm}, \quad E_n = 21.5 \text{ MPa}, \quad G_n = 7.71 \text{ MPa}$$

$$E \cdot I = 475 \cdot 10^2 \quad (\text{Flecha en mm y carga en N})$$

$$G \cdot \Omega = 650 \cdot 10^2$$

$$\delta(\text{mm}) = \frac{P \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I} + \frac{P \cdot L}{G \cdot \Omega} = \left(0.7 \cdot 10^{-2} + 1.54 \cdot 10^{-2}\right) P(\text{N}) \quad (\text{flexión+cortante}) \quad [7.6]$$

7.3. CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN PANEL SANDWICH.

La caracterización mecánica de un panel sandwich se realiza mediante el ensayo de flexión en cuatro puntos, tal como se indica en la figura. Como

resultados de este ensayo se pueden obtener: la máxima tensión en las pieles, la tensión tangencial y el módulo de rigidez (G) del núcleo.

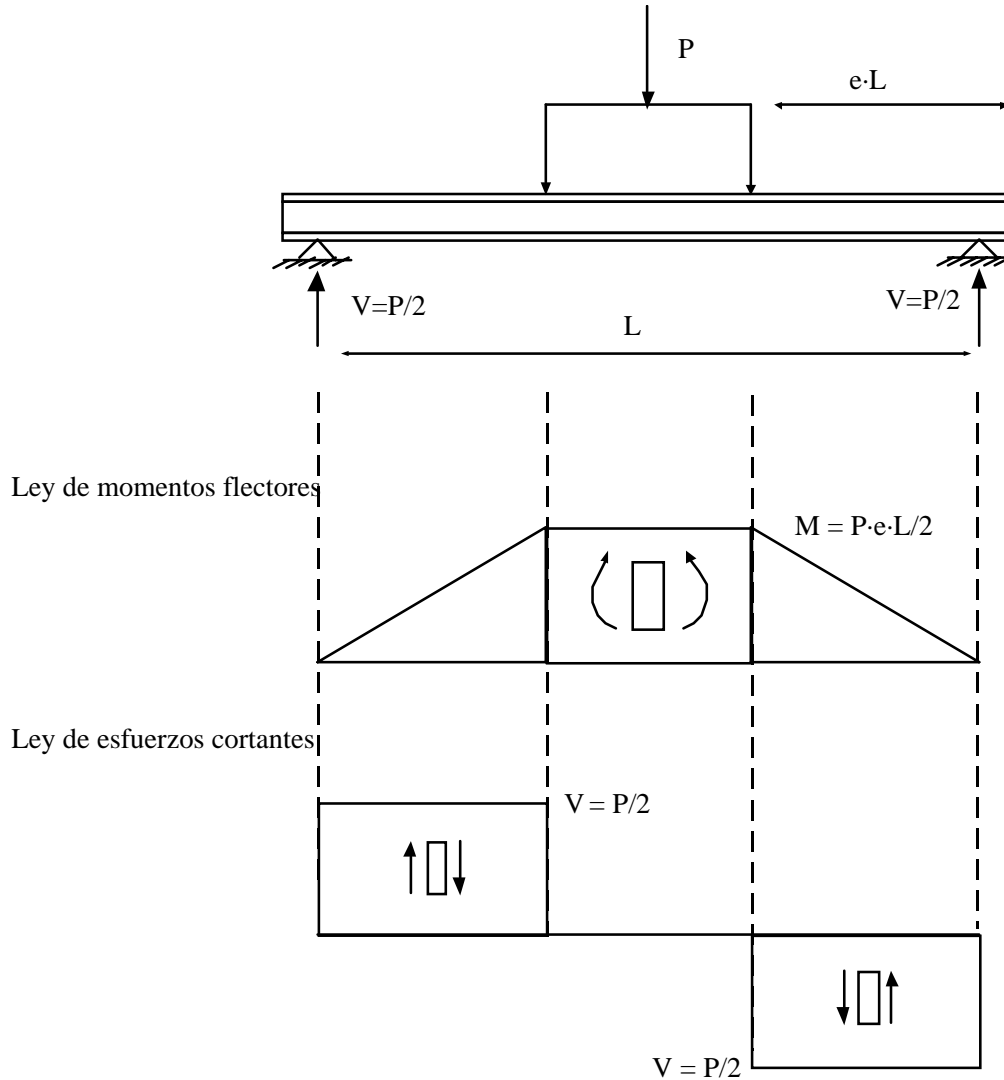


Figura 7.8

Los datos de este ensayo son:

Geometría de la viga

- B = Ancho de la viga
- e = Espesor total del panel sándwich ($e = 2 \cdot e_p + e_n$)

Propiedades de la piel y del núcleo

- ν = Coeficiente de Poisson de la piel
- E = Módulo de elasticidad de la piel
- A_n = Área a cortante: $A_n = B \cdot \frac{e + e_p}{2}$
- D = Rigidez a flexión. $D = \frac{E \cdot I}{1 - \nu^2}$
- I = Momento de inercia respecto al eje neutro:
$$I = \frac{B \cdot (e - e_n)}{4} \cdot \left(\frac{e + e_n}{2} \right)^2$$

De este ensayo se obtiene un registro de la carga aplicada frente al desplazamiento del punto medio de la viga, a partir del cual es posible construir la curva de la Figura 7.9.

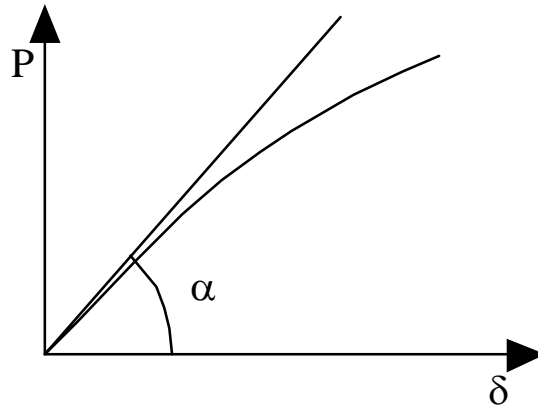


Figura 7.9. Registro fuerza-desplazamiento obtenido de un ensayo de flexión

A partir de esta curva y considerando los diagramas de esfuerzos representados en la Figura 7.8 se puede determinar las diferentes variables:

- **Tensión en las pieles:**

$$\sigma = \frac{M \cdot \frac{e}{2}}{I} \quad [7.7]$$

- **Tensión cortante en el núcleo:**

$$\tau = \frac{V}{A_n} \cdot k \quad [7.8]$$

Donde k = Factor de cortadura

- **Máxima deflexión:**

$$\delta = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot D} \cdot (3 \cdot e - 4 \cdot e^3) + \frac{V \cdot e \cdot L}{A_n \cdot G_n} \cdot k \quad [7.9]$$

- **Módulo de rigidez:**

$$G = \frac{\left(\frac{P}{\delta}\right)_0 \cdot e \cdot L}{B \cdot (e + e_n) \cdot \left[1 - \left(\frac{P}{\delta}\right)_0 \cdot \frac{L^3 \cdot (3 \cdot e - 4 \cdot e^3)}{48 \cdot D}\right]} \quad [7.10]$$

Donde

$$\left(\frac{P}{\delta}\right)_0$$

es la pendiente de la curva fuerza-desplazamiento en el origen. Para determinar estas variables se ha utilizado las ecuaciones de la resistencia de materiales para vigas en las que se ha hecho la sustitución de las ecuaciones [7.4] y [7.5].

7.4. NÚCLEO EN NIDO DE ABEJA

7.4.1 DEFINICIÓN

Dentro de los diferentes núcleos para paneles sandwich se suele emplear con profusión el denominado "nido de abeja", que consisten en láminas

muy delgadas unidas unas a otras de manera que forman un conjunto de células interconectadas. Este tipo de configuración del núcleo tiene su origen en China (hace 2000 años) y se ha utilizado ampliamente en la Industria Aeronáutica (desde 1940).

7.4.2 TIPOS DE NIDO DE ABEJA

Los nidos de abeja pueden ser fabricados utilizando un material base metálico u otro no metálico. A continuación se resumen los materiales más utilizados.

Metálicos. Se pueden emplear diferentes aceros y aleaciones ligeras, principalmente de aluminio. Entre ellas se encuentran:

- - Al 5052 Aleación muy utilizada en la industria aeronáutica debido a que es resistente a la corrosión.
- - Al 5056 Esta aleación presenta también una buena resistencia a la corrosión, con unas propiedades mecánicas mejores que la Al5052.
- - Al 2024 Posee unas buenas propiedades mecánicas a temperaturas elevadas.

No metálicos.

- - Tejidos de fibra de vidrio impregnados con resina. Presentan un excelente comportamiento a altas temperaturas y unas bajas constantes dieléctricas.
- - NOMEX[®] (Fibra de aramida/resina fenólica). Se caracterizan por su alta resistencia y tenacidad.
- - Cartón Kraft con resina fenólica. Este material es muy utilizado por su bajo costo y alta resistencia.
- - Fibra de carbono/resina epoxi.
- - Tejido Kevlar/resina epoxi.

Los nidos de abeja metálicos resultan baratos y resistentes, mientras que los no metálicos son insensibles a la corrosión y resultan buenos aislantes térmicos.

7.4.3 MÉTODOS DE FABRICACIÓN DEL NUCLEO EN NIDO DE ABEJA.-

A continuación se resumen los dos métodos de fabricación de núcleos de nido de abeja.

- **Expansión.** Se utiliza tanto para metales como para no metales. La mayoría de los nidos de abeja se fabrican mediante este procedimiento. Sobre láminas del material elegido se distribuye un adhesivo en líneas paralelas, apilando unas láminas sobre otras y curando el conjunto a elevada temperatura en una prensa. Una vez curado se procede a la expansión del bloque.
- **Corrugación.** Se emplea sólo en metales. Las láminas del material seleccionado pasan por unos rodillos corrugadores que le dan a forma final. Posteriormente se aplica el adhesivo y se construye la estructura de nido de abeja.