

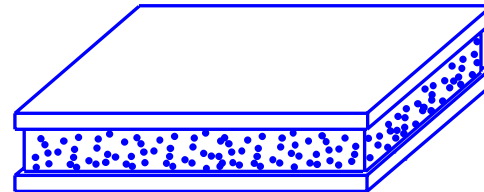


PANELES SANDWICH

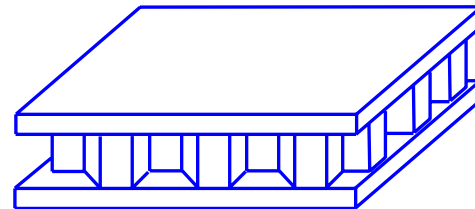
Carlos Navarro

Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

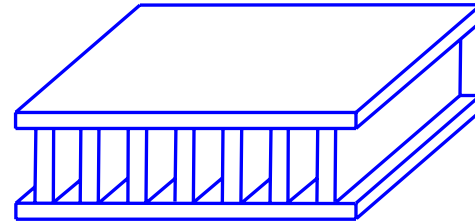
PANELES SANDWICH



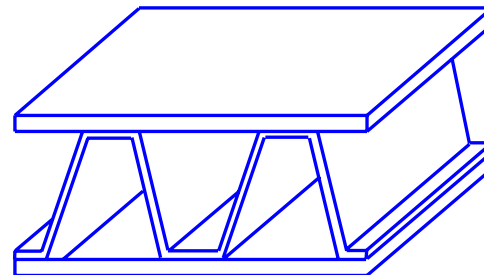
(a) Núcleo de espuma (foam)



(b) Núcleo de nido de abeja

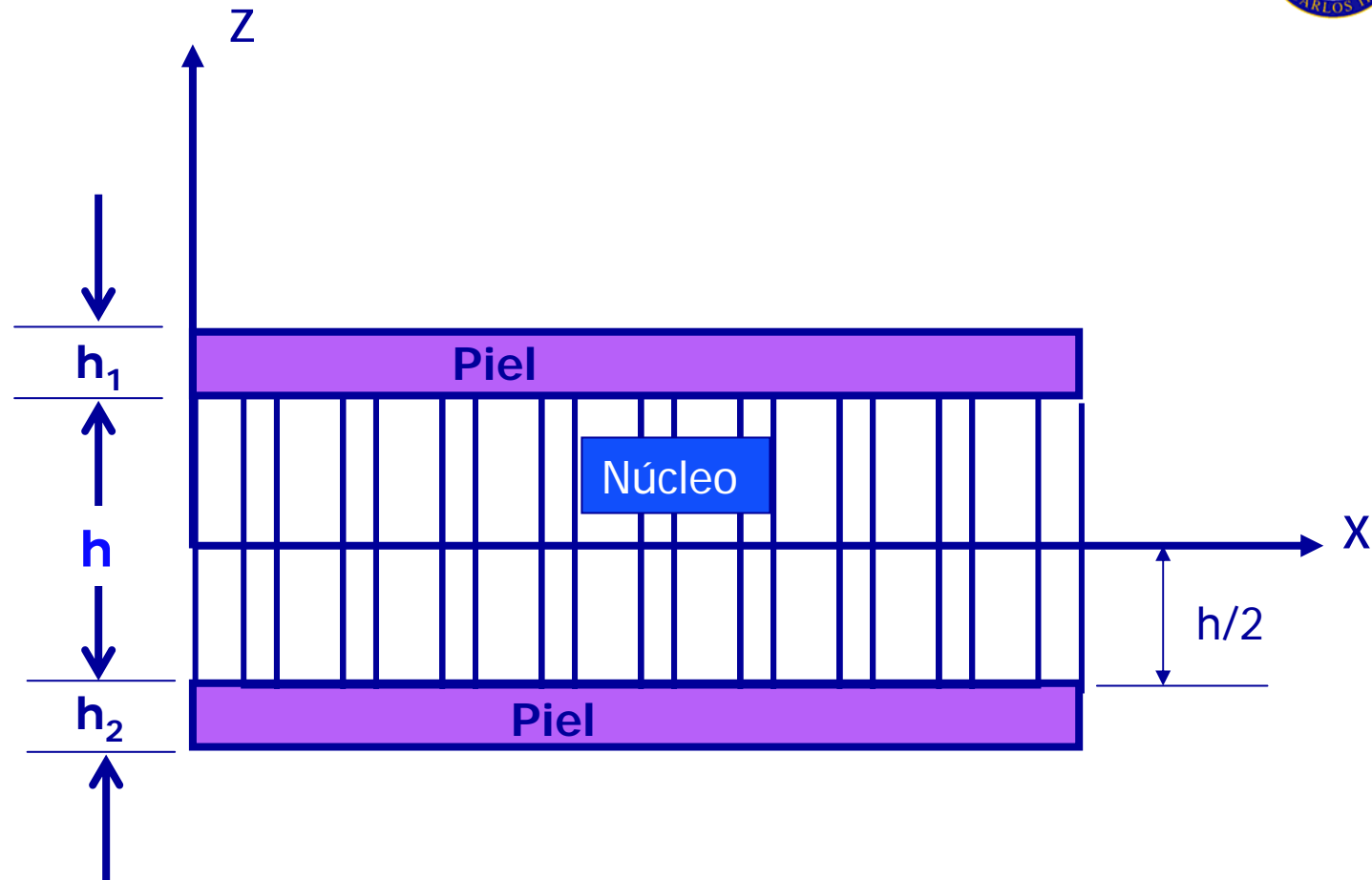


(c) Núcleo web



(d) Núcleo corrugado

PANELES SANDWICH





Empleando la Resistencia de materiales

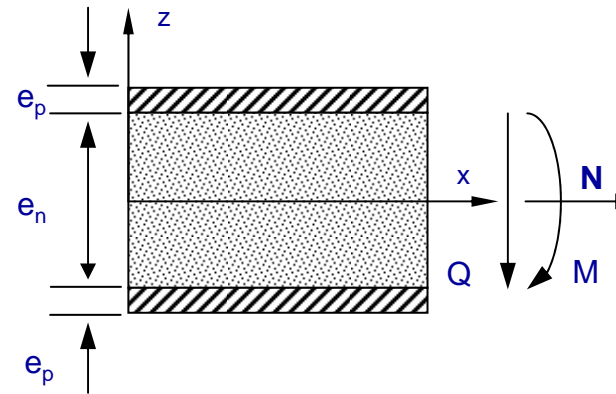


Tensiones en una viga sándwich

$$\sigma_p^+ = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{N}{B \cdot e_p} + \frac{2 \cdot M}{B \cdot e_p \cdot (e_p + e_n)} \right]$$

$$\sigma_p^- = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{N}{B \cdot e_p} - \frac{2 \cdot M}{B \cdot e_p \cdot (e_p + e_n)} \right]$$

$$\tau_n = - \frac{Q}{B \cdot (e_n + e_p)}$$



Deformaciones en una viga sándwich

$$\varepsilon_x(z) = \varepsilon_x^0 + \frac{1}{R} \cdot z$$

$$\varepsilon_x^0 = \frac{N}{2 \cdot E_p \cdot B \cdot e_p} \quad \frac{1}{R} = \frac{2 \cdot M}{E_p \cdot B \cdot e_p \cdot (e_p + e_n)^2}$$



Cálculo de flechas y giros en vigas sándwich

$$E \cdot I \propto E_p \cdot \frac{B \cdot e_p \cdot (e_p + e_n)^2}{2}$$

$$G \cdot A_c \propto G_n \cdot \frac{B \cdot (e_n + e_p)^2}{e_n \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot e_p \cdot G_n}{3 \cdot e_n \cdot G_p}\right)} \approx G_n \cdot B \cdot (e_n + 2 \cdot e_p)$$

Carga crítica de pandeo global en una viga sándwich

$$P_{\text{pandeo}} = \frac{1}{2 \cdot e_p \cdot \left(1 + \frac{\pi^2 \cdot \langle EI \rangle}{L^2 \cdot G_n \cdot (e_n + e_p) \cdot B}\right)} \cdot \frac{\pi^2 \cdot \langle EI \rangle}{L}$$



HIPÓTESIS DE CÁLCULO:

- 1.- El material del núcleo presenta un comportamiento transversalmente isótropo y posee un espesor mucho más grande que el de las pieles ($h \gg h_1, h_2$)
- 2.- Las tensiones en el plano del núcleo ($\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$) son despreciables
- 3.- Los desplazamientos en el plano del núcleo (u_n y v_n) varían linealmente con la coordenada “z”
- 4.- Los desplazamientos en el plano de las pieles (u_p y v_p) son uniformes a lo largo del espesor de las pieles
- 5.- Las tensiones fuera del plano en las pieles (τ_{xz}, τ_{yz}) son despreciables
- 6.- Los desplazamientos son pequeños en comparación con el espesor del sandwich
- 7.- Las deformaciones en el plano son pequeñas en comparación con la unidad



HIPÓTESIS DE CÁLCULO (Cont):

- 8.- El desplazamiento transversal w es independiente de la coordenada “ z ” y, por tanto, ε_z es despreciable
- 9.- Tanto los materiales del núcleo y de las pieles obedecen a la ley de Hooke
- 10.- En núcleo y las pieles tienen espesor constante



Basándonos en la 3ª hipótesis

$$u_n = u^0(x, y) + z\theta_x(x, y)$$

$$v_n = v^0(x, y) + z\theta_y(x, y)$$



Basándonos en la 4^a hipótesis

$$\begin{aligned}u_1 &= u^0 + \frac{h}{2} \theta_x & u_2 &= u^0 - \frac{h}{2} \theta_x \\v_1 &= v^0 + \frac{h}{2} \theta_y & v_2 &= v^0 - \frac{h}{2} \theta_x\end{aligned}$$

Los subíndices se refieren a la piel superior (1) y a la inferior (2)



Basándonos en la 8ª hipótesis

$$\mathbf{w} = \mathbf{w}(\mathbf{x}, y)$$



Deformaciones en el núcleo :

$$\varepsilon_{xz}^n = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} = \theta_x + \frac{\partial w}{\partial x}$$

$$\varepsilon_{yz}^n = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} = \theta_y + \frac{\partial w}{\partial y}$$



DEFORMACIONES EN EL PLANO MEDIO

$$\varepsilon_x^0 = \frac{\partial u^0}{\partial x}$$

$$\varepsilon_y^0 = \frac{\partial v^0}{\partial y}$$

$$\gamma_{xy}^0 = \frac{\partial u^0}{\partial y} + \frac{\partial v^0}{\partial x}$$



CURVATURAS

$$K_x = \frac{\partial \theta_x}{\partial x}$$

$$K_y = \frac{\partial \theta_y}{\partial y}$$

$$K_{xy} = \left(\frac{\partial \theta_x}{\partial y} + \frac{\partial \theta_y}{\partial x} \right)$$



Piel superior (1):

$$\varepsilon_x^{(1)} = \varepsilon_x^0 + \frac{h}{2} \kappa_x$$

$$\varepsilon_y^{(1)} = \varepsilon_y^0 + \frac{h}{2} \kappa_y$$

$$\varepsilon_{xy}^{(1)} = \varepsilon_{xy}^0 + \frac{h}{2} \kappa_{xy}$$



Piel inferior (2):

$$\varepsilon_x^{(2)} = \varepsilon_x^0 - \frac{h}{2} \kappa_x$$

$$\varepsilon_y^{(2)} = \varepsilon_y^0 - \frac{h}{2} \kappa_y$$

$$\varepsilon_{xy}^{(2)} = \varepsilon_{xy}^0 - \frac{h}{2} \kappa_{xy}$$



EQUIVALENCIA FUERZAS EN EL PLANO-TENSIONES

$$N_x = \int_{-(h/2+h_2)}^{-h/2} \sigma_x dz + \int_{h/2}^{h/2+h_1} \sigma_x dz$$

$$N_y = \int_{-(h/2+h_2)}^{-h/2} \sigma_y dz + \int_{h/2}^{h/2+h_1} \sigma_y dz$$

$$N_{xy} = \int_{-(h/2+h_2)}^{-h/2} \tau_{xy} dz + \int_{h/2}^{h/2+h_1} \tau_{xy} dz$$

En el núcleo:

$$\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy} = 0$$



EQUIVALENCIA MOMENTOS-TENSIONES

$$M_x = \int_{-\left(\frac{h}{2}+h_2\right)}^{-\left(\frac{h}{2}\right)} \sigma_x z dz + \int_{\left(\frac{h}{2}\right)}^{\left(\frac{h}{2}+h_1\right)} \sigma_x z dz$$

$$M_y = \int_{-\left(\frac{h}{2}+h_2\right)}^{-\left(\frac{h}{2}\right)} \sigma_y z dz + \int_{\left(\frac{h}{2}\right)}^{\left(\frac{h}{2}+h_1\right)} \sigma_y z dz$$

$$M_{xy} = \int_{-\left(\frac{h}{2}+h_2\right)}^{-\left(\frac{h}{2}\right)} \tau_{xy} z dz + \int_{\left(\frac{h}{2}\right)}^{\left(\frac{h}{2}+h_1\right)} \tau_{xy} z dz$$

En el núcleo :

$$\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy} = 0$$



EQUIVALENCIA FUERZAS FUERA DEL PLANO-TENSIONES

$$Q_x = \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{xz} dz$$

$$Q_y = \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{yz} dz$$

(Hipótesis 5)



Relación tensión-deformación
en el $k^{\text{ésima}}$ lámina de la piel i

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x^{(k)} \\ \sigma_y^{(k)} \\ \tau_{xy}^{(k)} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11}^{(k)} & \bar{Q}_{12}^{(k)} & \bar{Q}_{16}^{(k)} \\ \bar{Q}_{12}^{(k)} & \bar{Q}_{22}^{(k)} & \bar{Q}_{26}^{(k)} \\ \bar{Q}_{16}^{(k)} & \bar{Q}_{26}^{(k)} & \bar{Q}_{66}^{(k)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^{(i)} \\ \varepsilon_y^{(i)} \\ \gamma_{xy}^{(i)} \end{Bmatrix} \quad (i = 1,2)$$



Relación tensiones-deformaciones
en el núcleo

$$\begin{Bmatrix} \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{23} & 0 \\ 0 & \mathbf{G}_{13} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \gamma_{yz}^{(n)} \\ \gamma_{xz}^{(n)} \end{Bmatrix}$$

PANELES SANDWICH



$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ \hline C_{11} & C_{12} & C_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ C_{16} & C_{26} & C_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix}$$

PANELES SANDWICH



$$A_{ij} = A_{ij}^{(1)} + A_{ij}^{(2)}$$

$$B_{ij} = \frac{h}{2} [A_{ij}^{(1)} - A_{ij}^{(2)}]$$

$$C_{ij} = C_{ij}^{(1)} + C_{ij}^{(2)}$$

$$D_{ij} = \frac{h}{2} [C_{ij}^{(1)} - C_{ij}^{(2)}]$$

$$A_{ij}^{(1)} = \int_{-h/2}^{(h/2+h_1)} \bar{Q}_{ij}^{(k)} dz \quad C_{ij}^{(1)} = \int_{-h/2}^{(h/2+h_1)} \bar{Q}_{ij}^{(k)} z dz$$
$$A_{ij}^{(2)} = \int_{-(h/2+h_2)}^{-h/2} \bar{Q}_{ij}^{(k)} dz \quad C_{ij}^{(2)} = \int_{-(h/2+h_2)}^{-h/2} \bar{Q}_{ij}^{(k)} z dz$$

Si las dos pieles fuesen idénticas:

$$A_{ij}^{(1)} = A_{ij}^{(2)}$$

$$C_{ij}^{(1)} = -C_{ij}^{(2)}$$

$$A_{ij} = 2A_{ij}^{(1)}$$

$$D_{ij} = hC_{ij}$$

$$B_{ij} = 0$$

$$C_{ij} = 0$$



CORTANTE TRANSVERSAL AL PANEL

$$\begin{Bmatrix} Q_y \\ Q_x \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{23} & 0 \\ 0 & G_{13} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_y + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \theta_x + \frac{\partial w}{\partial x} \end{Bmatrix}$$



APROXIMACIÓN:

Tratemos a las pieles como si estuviesen realizadas de un material homogéneo:

$$\text{Rigidez efectiva} = \frac{A_{ij}^{(k)}}{h_k} \quad k = 1, 2$$

$$C_{ij} = \frac{h}{2} \left[\left(1 + \frac{h_1}{h} \right) A_{ij}^{(1)} - \left(1 + \frac{h_2}{h} \right) A_{ij}^{(2)} \right]$$

$$D_{ij} = \frac{h^2}{4} \left[\left(1 + \frac{h_1}{h} \right) A_{ij}^{(1)} + \left(1 + \frac{h_2}{h} \right) A_{ij}^{(2)} \right]$$



ECUACIONES DE EQUILIBRIO BASADAS EN DESPLAZAMIENTOS:

$$\begin{aligned} & A_{11} \frac{\partial^2 u^0}{\partial x^2} + 2A_{16} \frac{\partial^2 u^0}{\partial x \partial y} + A_{66} \frac{\partial^2 u^0}{\partial y^2} \\ & + A_{16} \frac{\partial^2 v^0}{\partial x^2} + (A_{12} + A_{66}) \frac{\partial^2 v^0}{\partial x \partial y} + A_{26} \frac{\partial^2 v^0}{\partial y^2} \\ & + B_{11} \frac{\partial^2 \theta_x}{\partial x^2} + 2B_{16} \frac{\partial^2 \theta_x}{\partial x \partial y} + B_{66} \frac{\partial^2 \theta_x}{\partial y^2} \\ & + B_{16} \frac{\partial^2 \theta_y}{\partial x^2} + (B_{12} + B_{66}) \frac{\partial^2 \theta_y}{\partial x \partial y} + B_{26} \frac{\partial^2 \theta_y}{\partial y^2} = 0 \end{aligned}$$

PANELES SANDWICH



$$\begin{aligned} & \mathbf{A}_{16} \frac{\partial^2 \mathbf{u}^0}{\partial x^2} + (\mathbf{A}_{12} + \mathbf{A}_{66}) \frac{\partial^2 \mathbf{u}^0}{\partial x \partial y} + \mathbf{A}_{26} \frac{\partial^2 \mathbf{u}^0}{\partial y^2} \\ & + \mathbf{A}_{66} \frac{\partial^2 \mathbf{v}^0}{\partial x^2} + 2\mathbf{A}_{26} \frac{\partial^2 \mathbf{v}^0}{\partial x \partial y} + \mathbf{A}_{22} \frac{\partial^2 \mathbf{v}^0}{\partial y^2} \\ & + \mathbf{B}_{16} \frac{\partial^2 \theta_x}{\partial x^2} + (\mathbf{B}_{12} + \mathbf{B}_{66}) \frac{\partial^2 \theta_x}{\partial x \partial y} + \mathbf{B}_{26} \frac{\partial^2 \theta_x}{\partial y^2} \\ & + \mathbf{B}_{66} \frac{\partial^2 \theta_y}{\partial x^2} + 2\mathbf{B}_{26} \frac{\partial^2 \theta_y}{\partial x \partial y} + \mathbf{B}_{22} \frac{\partial^2 \theta_y}{\partial y^2} = 0 \end{aligned}$$

PANELES SANDWICH



$$\begin{aligned} & C_{11} \frac{\partial^2 u^0}{\partial x^2} + 2C_{16} \frac{\partial^2 u^0}{\partial x \partial y} + C_{66} \frac{\partial^2 u^0}{\partial y^2} + C_{16} \frac{\partial^2 v^0}{\partial x^2} \\ & + (C_{12} + C_{66}) \frac{\partial^2 v^0}{\partial x \partial y} + C_{26} \frac{\partial^2 v^0}{\partial y^2} + D_{11} \frac{\partial^2 \theta_x}{\partial x^2} \\ & + 2D_{16} \frac{\partial^2 \theta_x}{\partial x \partial y} + D_{66} \frac{\partial^2 \theta_x}{\partial y^2} + D_{16} \frac{\partial^2 \theta_y}{\partial x^2} \\ & + (D_{12} + D_{66}) \frac{\partial^2 \theta_y}{\partial x \partial y} + D_{26} \frac{\partial^2 \theta_y}{\partial y^2} - G_{13} h \left(\theta_x + \frac{\partial w}{\partial x} \right) = 0 \end{aligned}$$

PANELES SANDWICH



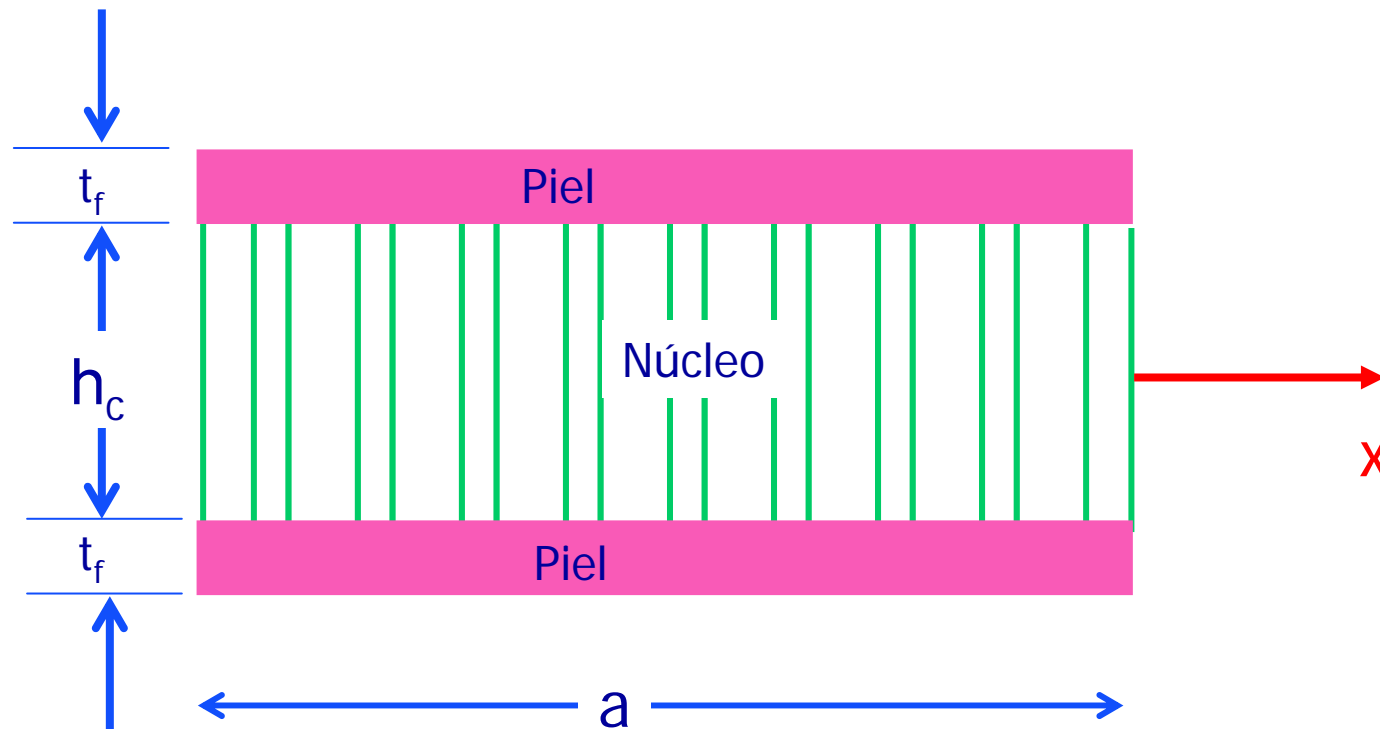
$$\begin{aligned} & \mathbf{C}_{16} \frac{\partial^2 u^0}{\partial x^2} + (\mathbf{C}_{12} + \mathbf{C}_{66}) \frac{\partial^2 u^0}{\partial x \partial y} + \mathbf{C}_{26} \frac{\partial^2 u^0}{\partial y^2} + \mathbf{C}_{66} \frac{\partial^2 v^0}{\partial x^2} \\ & + 2\mathbf{C}_{26} \frac{\partial^2 v^0}{\partial x \partial y} + \mathbf{C}_{22} \frac{\partial^2 v^0}{\partial y^2} + \mathbf{D}_{16} \frac{\partial^2 \theta_x}{\partial x^2} \\ & + (\mathbf{D}_{12} + \mathbf{D}_{66}) \frac{\partial^2 \theta_x}{\partial x \partial y} + \mathbf{D}_{26} \frac{\partial^2 \theta_x}{\partial y^2} + \mathbf{D}_{66} \frac{\partial^2 \theta_y}{\partial x^2} \\ & + 2\mathbf{D}_{26} \frac{\partial^2 \theta_y}{\partial x \partial y} + \mathbf{D}_{22} \frac{\partial^2 \theta_y}{\partial y^2} - \mathbf{G}_{23} h \left(\theta_y + \frac{\partial w}{\partial y} \right) = 0 \end{aligned}$$

PANELES SANDWICH



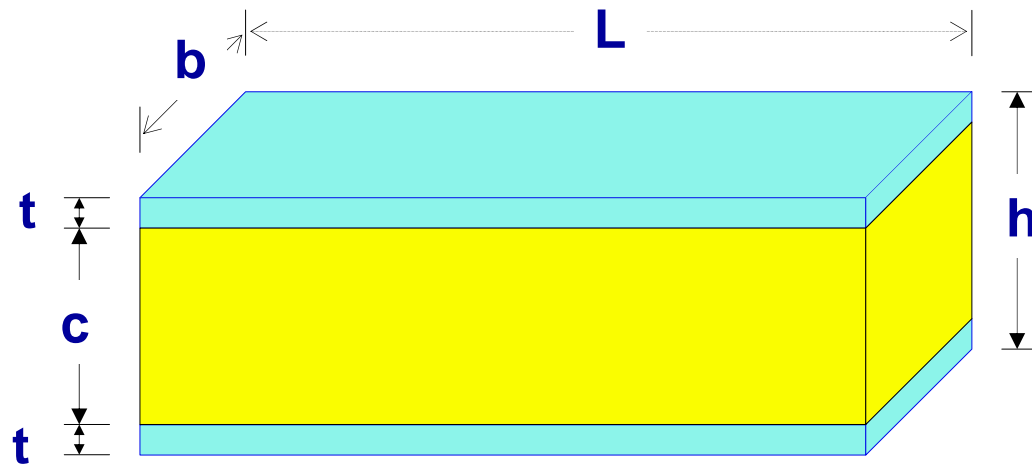
$$\mathbf{G}_{13}h \left(\frac{\partial \theta_x}{\partial x} + \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) + \mathbf{G}_{23}h \left(\frac{\partial \theta_y}{\partial y} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) + N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2N_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + N_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + q = 0$$

PANELES SANDWICH



Alzado

PANELES SANDWICH (núcleo de espuma)



Propiedades del núcleo:

E_n^* = *Módulo de elasticidad aparente de la espuma del núcleo*

ρ_n^* = *Densidad aparente de la espuma del núcleo*

PANELES SANDWICH (núcleo de espuma)



$$E_n^* = C_1 E_{mat} \left(\frac{\rho_n^*}{\rho_{mat}} \right)^2$$
$$G_n^* = C_2 E_{mat} \left(\frac{\rho_n^*}{\rho_{mat}} \right)^2$$

E_{mat} = Módulo de elasticidad del material del
que está fabricado la espuma

ρ_{mat} = Densidad del material del
que está fabricado la espuma

$$C_1 \approx 1$$

$$C_2 \approx 0,4$$

PANELES SANDWICH (núcleo de espuma)



Propiedades de las pieles:

E_p = Módulo de elasticidad equivalente de la piel

ρ_p = Densidad aparente de la piel

PANELES SANDWICH (núcleo de espuma)



Rigidez a flexión equivalente del panel sandwich:

$$(EI)_{equiv.} = \frac{E_p b t^3}{6} + \frac{E_n^* b c^3}{12} + \frac{E_p b t d^2}{2}$$

El tercer sumando es bastante más grande que los otros dos. Haciendo la hipótesis de que:

$$d \approx c$$

se obtiene::

$$(EI)_{equiv.} = \frac{E_p b t c^2}{2}$$

PANELES SANDWICH (núcleo de espuma)



Rigidez a cortante equivalente del panel sandwich:

$$(GA)_{equiv.} = \frac{G_n^* b d^2}{c} \approx bc G_n^*$$

PANELES SANDWICH (núcleo de espuma)



Cuando el panel se encuentra sometido a una carga exterior P , su flecha máxima viene dada por:

$$\delta = \delta_{flexión} + \delta_{cor tante} = \frac{PL^3}{B_1(EI)_{equiv.}} + \frac{PL}{B_2(GA)_{equiv.}}$$

PANELES SANDWICH (núcleo de espuma)



$$\delta = \delta_{flexión} + \delta_{cor tante} = \frac{PL^3}{B_1(EI)_{equiv.}} + \frac{PL}{B_2(GA)_{equiv.}}$$

Modo de carga	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄
Ménsula con carga (P) en el extremo	3	1	1	1
Ménsula con carga uniformemente distribuida (P/L)	8	2	2	1
Viga en flexion en tres puntos con carga central (P)	48	4	4	2
Viga en flexion en tres puntos con carga uniformemente distribuida (P/L)	384/5	8	8	2
Viga biempotrada con carga central (P)	192	4	8	2
Viga biempotrada con carga uniformemente distribuida (P/L)	384	8	12	2

PANELES SANDWICH (núcleo de espuma)



FLEXIBILIDAD:

$$\frac{\delta}{P} = \frac{l^3}{B_1 E_p b t c^2} + \frac{l}{B_2 b c G_n^*}$$

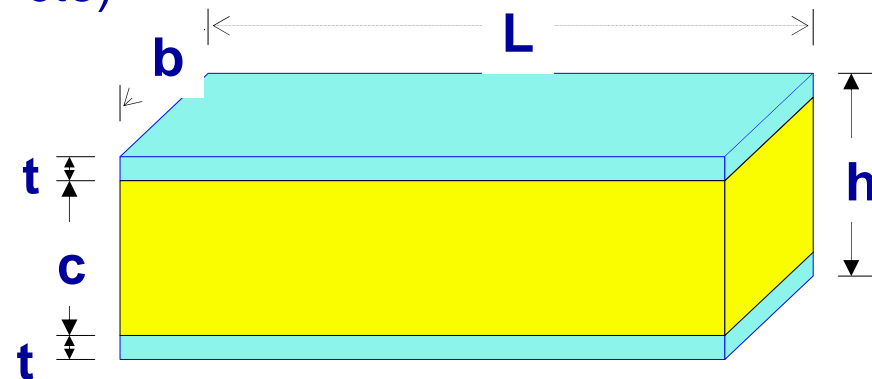
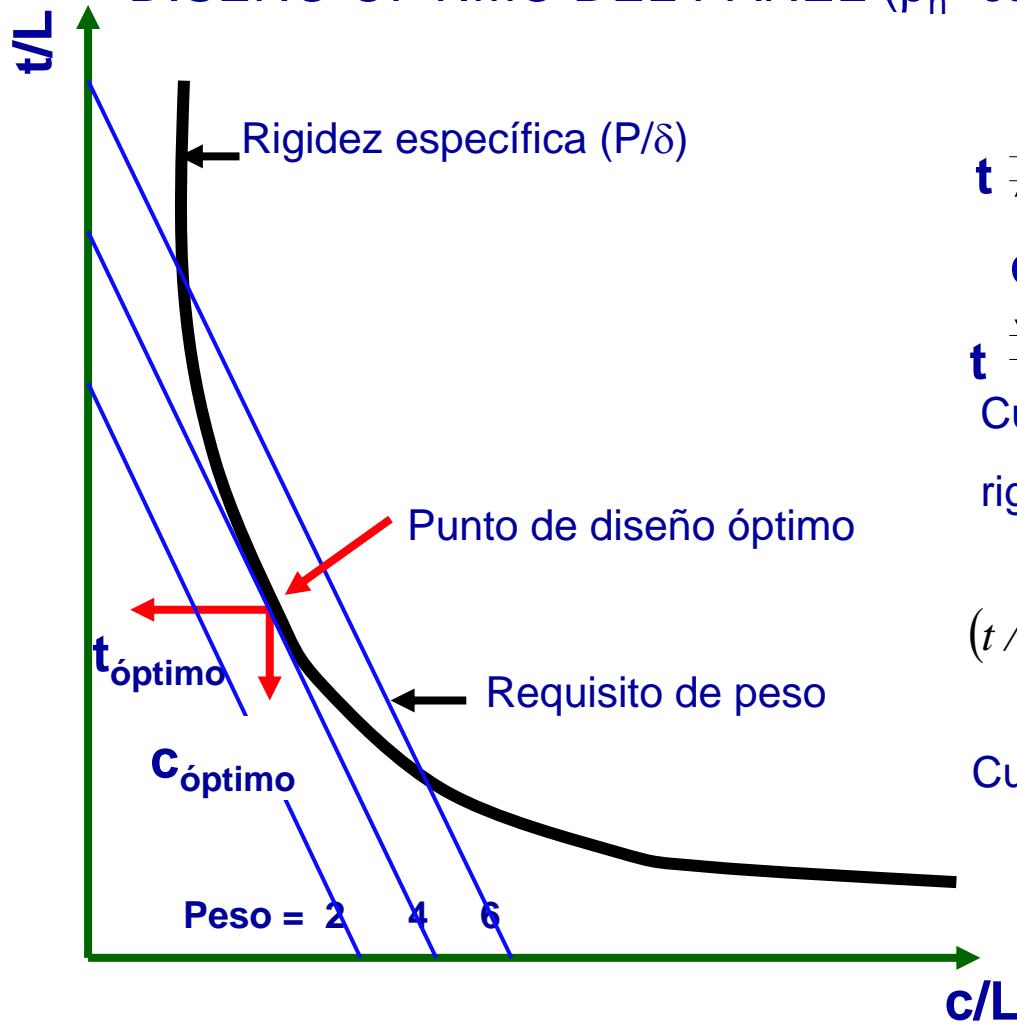
PESO:

$$W = 2 \rho_p g b l t + \rho_n^* g b l c$$

PANELES SANDWICH (núcleo de espuma)



DISEÑO ÓPTIMO DEL PANEL ($\rho_n^* = \text{cte}$)



Curva correspondiente a una rigidez (P/δ) dada:

$$(t/l) = \frac{2B_2}{B_1} \cdot \frac{G_n^*}{E_p(c/l)} \cdot \left[\frac{l}{B_2(\delta/P)bG_n^*(c/l) - 1} \right]$$

Curva correspondiente a un peso (W) dado:

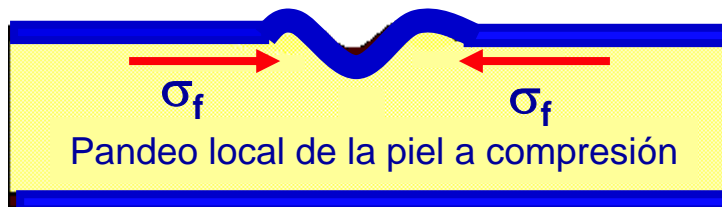
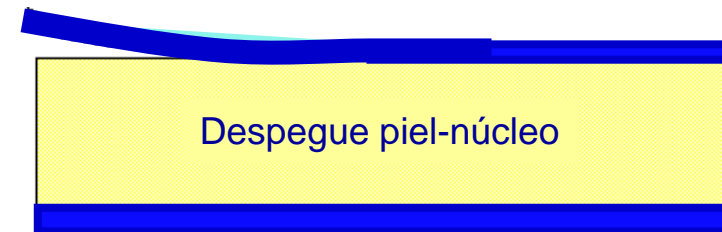
$$(t/l) = \frac{W}{2bl^2 \rho_p g} - \frac{\rho_n^*}{2\rho_p} \cdot (c/l)$$

PANELES SANDWICH (núcleo de espuma)

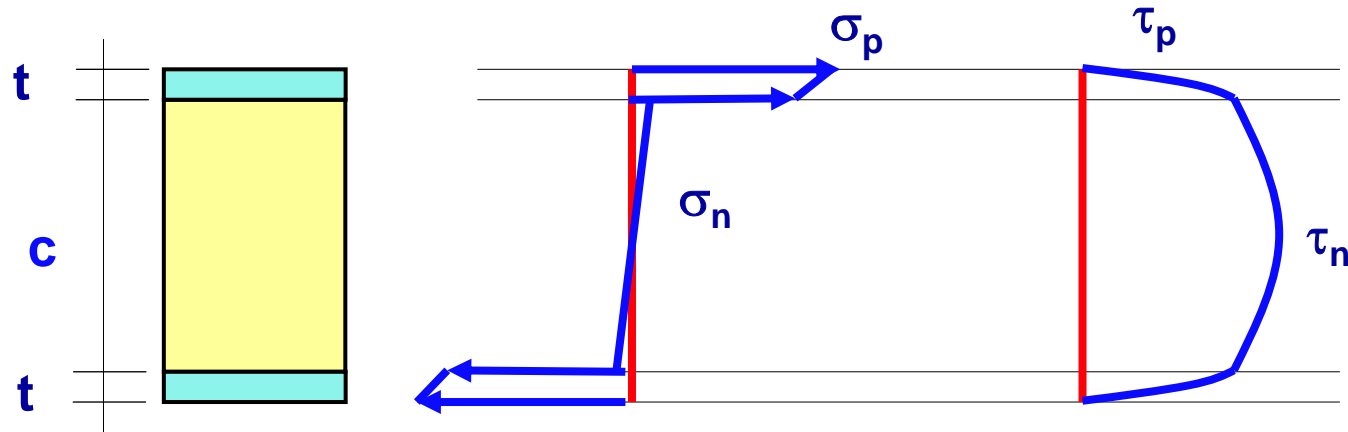


RESISTENCIA A LA ROTURA DE PANELES SANDWICH

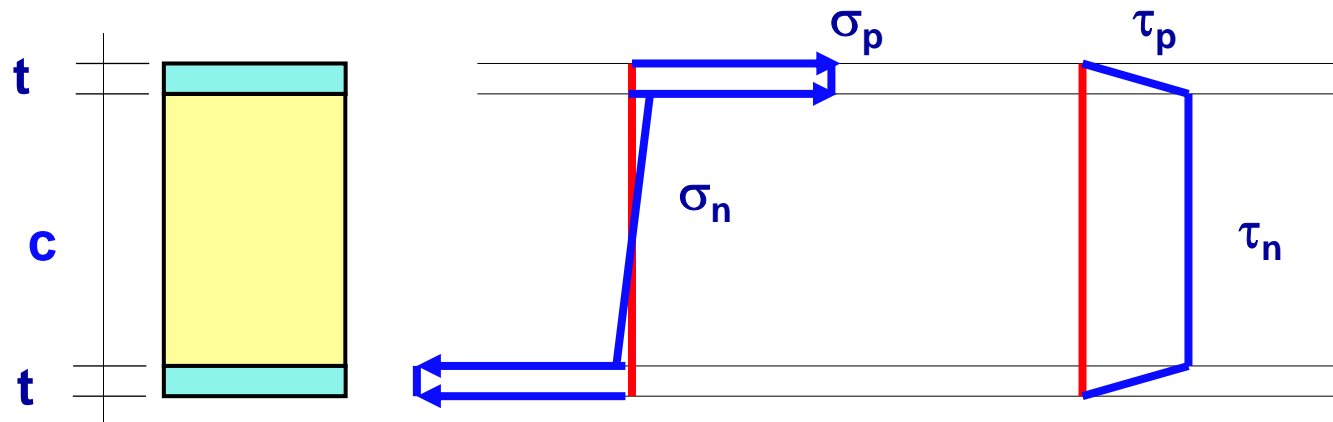
Modos de fallo a flexión:



PANELES SANDWICH (núcleo de espuma)



Distribución tensional real



Distribución tensional aproximada

PANELES SANDWICH (núcleo de espuma)



Tensiones normales

$$\sigma_p = \frac{MzE_p}{(EI)_{equiv}} = \frac{M}{btc} = \frac{Pl}{B_3btc}$$

$$\sigma_n = \frac{MzE_n^*}{(EI)_{equiv}} = \frac{M}{btc} \cdot \frac{E_n^*}{E_p} = \frac{Pl}{B_3btc} \cdot \frac{E_n^*}{E_p}$$

Tensiones tangenciales

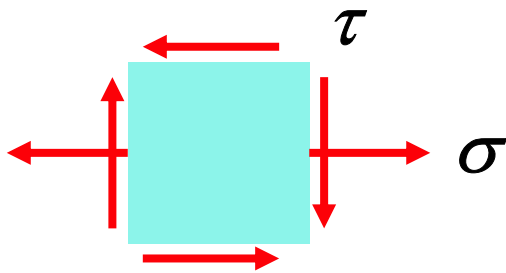
$$\tau_n = \frac{Q}{bc} = \frac{P}{B_4bc}$$

$$\bar{\tau}_p = \frac{\tau_c}{2}$$

PANELES SANDWICH (núcleo de espuma)



TENSIONES PRINCIPALES EN LAS PIELES O EN EL NÚCLEO:
(suponemos que no existen tensiones según z)



$$\sigma_1 = \frac{\sigma}{2} \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2\tau}{\sigma} \right)^2} \right]$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma}{2} \left[1 - \sqrt{1 + \left(\frac{2\tau}{\sigma} \right)^2} \right]$$

$$\tau_{\text{máx}} = \frac{\sigma}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{2\tau}{\sigma} \right)^2}$$

PANELES SANDWICH (núcleo de espuma)



En las pieles, podemos suponer que:

$$\frac{\tau_p}{\sigma_p} \left(= \frac{B_3}{B_4} \cdot \frac{t}{l} \right) \text{ es una cantidad pequeña, por lo que:}$$

$$\sigma_1 = \sigma_p \quad \sigma_2 = 0 \quad \tau_{\max} = \tau_p$$

En el núcleo, podemos suponer que:

$$\frac{\tau_n}{\sigma_n} \left(= \frac{B_3}{B_4} \cdot \frac{t}{l} \cdot \frac{E_p}{E_n^*} \right) \text{ Es, en general, una cantidad grande, por lo que:}$$

$$\sigma_1 = \tau_n \quad \sigma_2 = -\tau_n \quad \tau_{\max} = \tau_c$$

PANELES SANDWICH (núcleo de espuma)



$$M=PL/B_3$$

La piel falla cuando la tensión normal alcanza su resistencia (tensión de cedencia, para materiales dúctiles y tensión de rotura para materiales frágiles)

$$P \geq \sigma_{yp} \cdot \frac{B_3 b t c}{l}$$

PANELES SANDWICH (núcleo de espuma)



$$P \geq \frac{B_3 b t c}{l} \cdot 3 \left[\frac{E_p \cdot E_n^{*2}}{12(3 - \nu_n^*)^2 (1 + \nu_n^*)^2} \right]^{1/3}$$

Si: $\nu_n^* = 1/3$ y $E_n^* = \left(\frac{\rho_n^*}{\rho_p} \right)^2 E_p$

$$P \geq \frac{B_3 b t c}{l} \cdot 0,57 \left[E_p \cdot E_n^{*2} \left(\frac{\rho_n^*}{\rho_p} \right)^4 \right]^{1/3}$$

PANELES SANDWICH (núcleo de espuma)



$$P \geq CB_4 bc \left(\frac{\rho_n^*}{\rho_p} \right)^{3/2} \sigma_{yf}$$

$$\sigma_1 = \tau_n = \sigma_{np}^* = \frac{K_{1n}^*}{\sqrt{\pi a}}$$

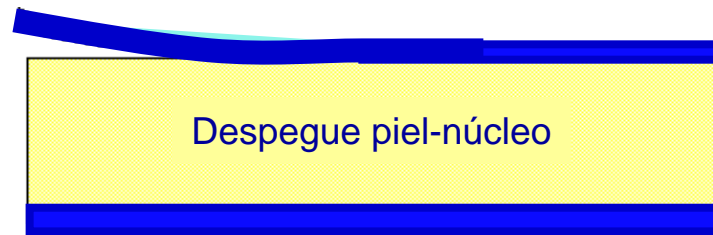
Núcleo de material frágil:

l^* = tamaño de la célula

a = longitud de fisura ($>4l^*$)

$$P \geq CB_4 bc \left(\frac{\rho_n^*}{\rho_p} \right)^{3/2} \sigma_{yf} \sqrt{\frac{l^*}{a}}$$

PANELES SANDWICH (núcleo de espuma)



Probablemente este tipo de fallo sea el más difícil de analizar. En general, para núcleos de espuma, las pieles se pegan al núcleo mediante resina Epoxi, la cual es más fuerte que el “foam” que constituye el núcleo y, por tanto, el fallo más bien se produce en el propio núcleo que en el propio adhesivo. El análisis hay que realizarlo en términos de energía.

PANELES SANDWICH (núcleo de espuma)



Energía almacenada en el panel trabajando a flexión pura:

$$U = \frac{1}{2} M \theta$$

$$M = \frac{(EI)_{equiv}}{R} = \frac{(EI)_{equiv} \cdot \theta}{L}$$

$$U = \frac{1}{2} \frac{M^2 L}{(EI)_{equiv}}$$

PANELES SANDWICH (núcleo de espuma)



Si suponemos la existencia de una fisura de longitud 2^a :

Superficie de la fisura = $2ab$

Si la fisura se propagase una longitud da , la variación de Energía sería:

$$dU = -\frac{2b \cdot da}{Lb} U = -\frac{M^2}{(EI)_{equiv}} da$$

PANELES SANDWICH (núcleo de espuma)



G = Tasa de liberación de energía

$$G = -\frac{dU}{2b} \cdot da = \frac{M^2}{2b(EI)_{equiv}}$$

Por lo que:

$$P \geq \frac{B_3 b t c}{L} \sqrt{\frac{G E_f}{t}}$$

PANELES SANDWICH (núcleo de espuma)



$$P \geq \sigma^i \cdot A$$