

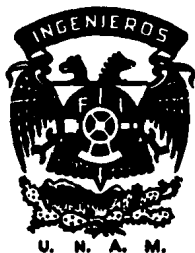
94  
2ej



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE INGENIERÍA

DESCRIPCIÓN, DISEÑO Y APLICACIONES  
DE PANELES ESTRUCTURALES

TESIS QUE PRESENTA  
CARLOS ENRIQUE AUGUSTO MELO Y CAIRE  
PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL



DIRECTOR DE LA TESIS  
ING. JULIO DAMY RIOS

TESIS CON  
VALIA DE ORIGEN

MEXICO, D.F. 1991



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# INDICE

## 1. ELEMENTOS DE UN PANEL ESTRUCTURAL

- a.- Descripción
- b.- Datos comparativos
- c.- Cubiertas
- d.- Núcleos
- e.- Adhesivos.

## 2. DISEÑO

- a.- Definición
- b.- Notación

## 3. DISEÑO ESTRUCTURAL

- a.- Cargas
- b.- Coeficientes de seguridad.
- c.- Causas de falla.
- d.- Fenómenos de inestabilidad propios de un panel estructural.
- e.- Propiedades de la sección transversal de un panel estructural
- f.- Rigidez a la flexión.
- g.- Rigidez al esfuerzo cortante.
- h.- Flecha de un panel estructural.
- i.- Diseño estructural de un panel bajo diversas condiciones de carga.
- j.- Fórmulas para revisión estructural de paneles.
- k.- Claro crítico.
- l.- Nomograma para el diseño de paneles estructurales.
- m.- Diseño de un panel estructural con la máxima relación Rigidez a la flexión / peso.
- n.- Resistencia al impacto.
- o.- Resistencia a la fatiga.

#### 4. DISEÑO TERMICO

- a.- Transmisión del calor.
- b.- Determinación experimental de la conductividad térmica de un material.
- c.- Conductividad térmica de un panel.
- d.- Transmisión del calor a través de un panel.

#### 5. DISEÑO ACUSTICO

- a.- Coeficiente de transmisión.
- b.- Propiedades acústicas.
- c.- Control por masa.
- d.- Nomograma para el diseño acústico de un panel.
- e.- Coeficiente de reflexión.

#### 6. ENSAYE

- a.- Procedimientos de ensaye
- b.- Pruebas de resistencia al fuego.
- c.- Pruebas de resistencia a la humedad.

#### 7. INTEMPERISMO

- a.- Agentes de intemperismo.
- b.- Pruebas de resistencia al intemperismo.
- c.- Especímenes para exposición al intemperismo.
- d.- Procedimiento de envejecimiento acelerado en laboratorio.
- e.- Procedimiento de ensaye.

## **8. PROCEDIMIENTOS DE CONSTRUCCION**

- a.- Fabricación de paneles.
- b.- Bordes e insertos.
- c.- Uniones de paneles.

## **9. APLICACIONES**

- a.- Ventajas y desventajas.
- b.- Criterios de elección.
- c.- Aplicaciones estructurales y no estructurales.

## **10. BIBLIOGRAFIA**

## PANEL ESTRUCTURAL

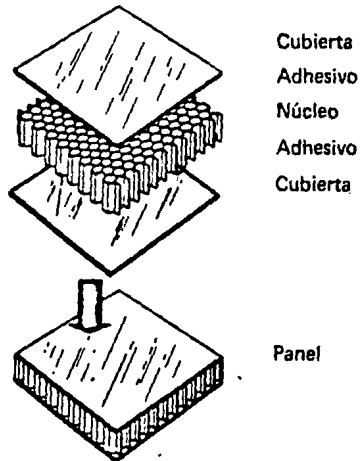
El desarrollo de adhesivos de alta resistencia, ha permitido crear un nuevo tipo de elemento constructivo: el PANEL ESTRUCTURAL.

Los elementos básicos que constituyen un panel estructural son:

**CUBIERTAS:** De material laminado capaz de resistir esfuerzos de tensión y compresión.

**NUCLEO:** Capaz de resistir esfuerzo cortante

**ADHESIVO:** Capaz de resistir esfuerzo de tensión y esfuerzo cortante. Une las cubiertas al núcleo para que trabajen solidariamente.



A los elementos básicos se pueden añadir elementos secundarios:

MARCO (elemento de borde)

INSERTOS

El concepto fundamental sobre el que se ha desarrollado el panel estructural, consiste en colocar a sus elementos constitutivos en la posición más eficiente: Las cubiertas alejadas del plano neutro, sujetas al núcleo para evitar su ondulamiento.

El eficiente aprovechamiento de los materiales en los paneles, ha hecho económicamente factible incorporar a la construcción de elementos estructurales materiales como el aluminio, el cobre, el acero inoxidable, el acero esmaltado, el plástico, etc., que a pesar de sus magníficas propiedades mecánicas, estéticas, de durabilidad, etc., se usaban en forma muy limitada por su alto costo por unidad de peso.

En comparación con otros tipos de elementos estructurales, el panel estructural ofrece muy alta resistencia y rigidez en relación a su peso.

**DATOS COMPARATIVOS DE VIGAS PLANAS DE IGUAL ANCHO****( $b = 30 \text{ cm.}$ ) E IGUAL RIGIDEZ ( $E I = 2.318 \times 10^6 \text{ Kg / cm}^2$  )**

Descripción	E Kg / cm <sup>2</sup>	I cm <sup>4</sup>	d cm	w Kg / m <sup>2</sup>	Relación de Pesos
Panel (1)	$0.562 \times 10^6$	4.12	2.6	3.6	1.00
Madera contrachapada de abedul	$0.088 \times 10^6$	26.39	2.2	15.9	4.45
Aluminio	$0.738 \times 10^6$	3.14	1.1	29.1	8.14
Acero	$2.100 \times 10^6$	1.10	0.8	58.6	16.40

E = módulo de elasticidad

I = momento de inercia

d = espesor total = peralte

w = peso / unidad de área

(1) Para el panel:

Cubiertas: de aluminio 0.016

Núcleo: celular de papel impregnado en resina

E: se tomó igual al 80% del valor del módulo de elasticidad del material de las cubiertas  
para considerar la deflexión por cortante

I: se calculó considerando únicamente las cubiertas



## CUBIERTAS

Al seleccionar las cubiertas de un panel se debe considerar:

1. **Resistencia mecánica**
  - a. Resistencia a la tensión
  - b. Resistencia a la compresión
  - c. Resistencia al impacto
  - d. Fatiga
  
2. **Resistencia al medio ambiente**
  - a. Resistencia a la corrosión
  - b. Resistencia a la abrasión
  - c. Resistencia al fuego
  
3. **Características físicas**
  - a. Aislamiento térmico
  - b. Transmisión del sonido
  - c. Reflexión del sonido
  - d. Permeabilidad
  - e. Estabilidad dimensional
  - f. Aislamiento eléctrico
  - g. Peso / unidad de área
  
4. **Características estéticas**
  - a. Textura
  - b. Colorido
  
5. **Costo**
  - a. Costo inicial
  - b. Durabilidad
  - c. Mantenimiento

## **DATOS PARA DISEÑO**

**Peso / unidad de área**

**Esfuerzo permisible a:**

**Tensión**

**Compresión**

**Cortante**

**Módulo de elasticidad a:**

**Tensión**

**Compresión**

**Cortante**

**Módulo de Poisson**

**Resistencia al impacto**

**Fatiga**

**Conductividad térmica**

**Transmisión del sonido**

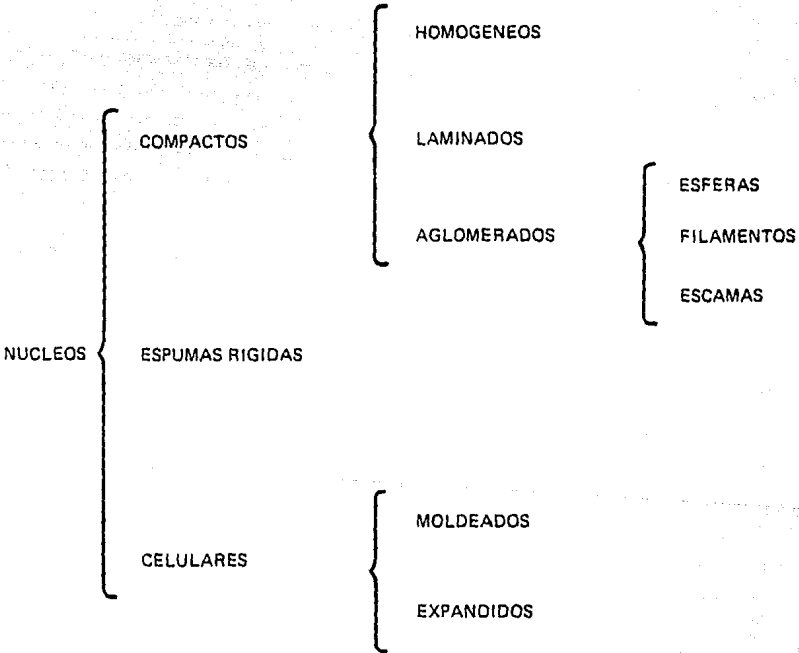
**Reflexión del sonido**

**Resistencia al fuego**

**Costo**

**NUCLEO**

**TIPOS DE NUCLEOS**



El núcleo de un panel estructural, puede estar constituido por:

**1. MATERIAL AGLOMERADO**

Puede ser:

- a. Microesferas de vidrio ó plástico
- b. Filamentos, por ejemplo fibra de vidrio
- c. Escamas, por ejemplo viruta de madera

**2. ESPUMA RIGIDA**

Puede ser:

- a. Metálica
- b. Plástica
- c. Vítreo

**3. MATERIAL CELULAR**

Puede ser:

- a. Moldeado:  
De celdillas trunco piramidales generalmente de sección transversal cuadrada. Semejante a una charola para huevos.
- b. Expandido:  
De celdillas tubulares, generalmente de sección exagonal. Semejante a un panal.

Las funciones estructurales principales del núcleo son:

1. Resistir el esfuerzo cortante que se genera, sin falla ni deformación apreciable.
2. Permitir un eficiente aprovechamiento del material de las cubiertas.
  - a. Alejándolo del plano neutro
  - b. Evitando que se ondule

Para una carga determinada, aumentando el espesor del núcleo se reducen los esfuerzos de tensión y compresión en las cubiertas, el esfuerzo cortante en el núcleo y la deflexión del panel.

Para lograr una correcta unión de las cubiertas con el núcleo, mediante el adhesivo, se requiere una tolerancia muy pequeña en la variación del espesor del núcleo.

Ningún núcleo es totalmente isotrópico.

Los núcleos de espuma rígida son prácticamente isotrópicos.

Los núcleos celulares son francamente ortotrópicos.

## **DATOS PARA DISEÑO**

Peso volumétrico

Esfuerzo permisible a:

Tensión de plano  
Compresión de plano  
Cortante

Módulo de elasticidad a:

Flexión  
Cortante

Módulo de Poisson

Resistencia al impacto

Fatiga

Conductividad térmica

Coefficiente de transmisión del sonido

Resistencia al fuego

Absorción de humedad

Costo

## NUCLEOS CELULARES EXPANDIDOS

El núcleo celular que ha tenido mayor utilización es el de celdillas tubulares de sección exagonal.

Se desarrolló inicialmente para aplicaciones en aeronáutica, posteriormente su uso se extendió a las industrias automotriz, naval y de la construcción de habitaciones. Actualmente se emplea también en cosmonáutica.

### DESCRIPCION

Es una estructura integrada por celdillas tubulares de sección exagonal de material laminado unido por bandas de adhesivo.

Las uniones se denominan **nudos** y se presentan alternadas.

El adhesivo de los nudos contribuye a la resistencia del núcleo a la compresión y al cortante.

### MATERIALES

El material que forma las paredes de las celdillas, de acuerdo con el uso al que se destine puede ser:

1. Aleación de acero (acero inoxidable, acero al titanio). Se usa en vehículos aeroespaciales y satélites artificiales.
2. Aleación de aluminio. Se usa en aviones.
3. Plástico. Se usa en barcos.
4. Papel impregnado en resina. Se usa en camiones y edificios.

## **CUALIDADES**

El núcleo celular proporciona al panel:

1. Alta relación rigidez / peso.
2. Aislamiento térmico.
3. Aislamiento acústico.

## **DEFECTOS**

1. Baja resistencia al impacto.
2. Propiedades mecánicas ortotrópicas

Estos inconvenientes se eliminan con cubiertas suficientemente rígidas para que distribuyan la fuerza del impacto y orientando al núcleo de acuerdo con las condiciones de carga y apoyo para obtener su funcionamiento más eficiente.

## **NUCLEO CELULAR EXPANDIDO DE PAPEL IMPREGNADO EN RESINA**

### **FABRICACION**

1. Se aplican las bandas de adhesivo a las hojas de papel.
2. Se unen las hojas aplicando presión y curando el adhesivo por calor.
3. Se expande.
4. Se aplica por inmersión la resina de impregnación.
5. Se cura en horno.

### **MATERIALES**

Papel:

Kraft, 100% neutro, no blanqueado

Adhesivo para las líneas de unión:

resina de fenol — formaldehído en una solución de agua y alcohol

Resina de impregnación:

Solución de fenol — formaldehído no modificado en alcohol etílico  
pH de 7.0 a 8.0

Contenido de formaldehído libre menor de 1%

Contenido de agua  $6 \pm 2\%$

### **ESPECIFICACIONES**

El núcleo celular de papel impregnado en resina debe cumplir las especificaciones:

AMS 3720

AMS 3722

MIL-E-5272

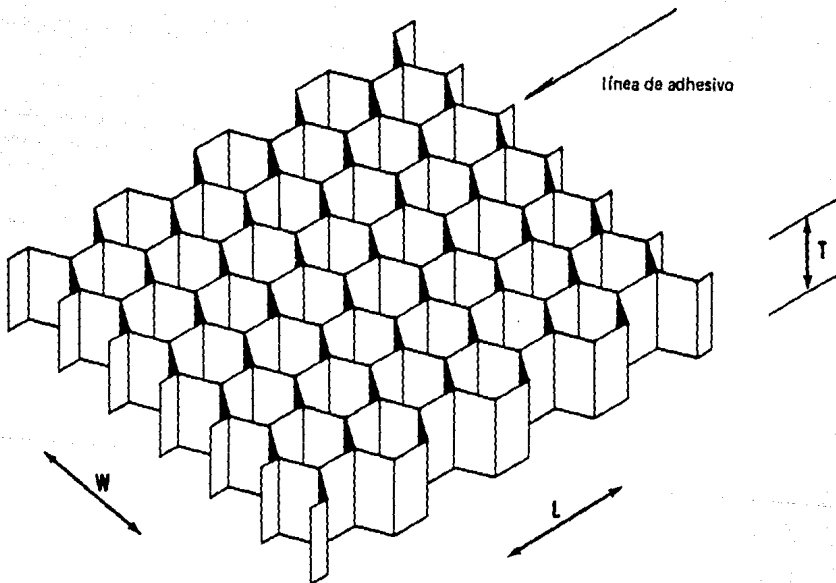


## NOTACION

L = Dirección paralela a las líneas de adhesivo

W = Dirección normal a las líneas de adhesivo (dirección de la expansión del núcleo).

T = Dirección normal al plano L - W



**El núcleo de un panel tiene orientación longitudinal (L), cuando las líneas de adhesivo son paralelas al claro del panel.**

**El núcleo de un panel tiene orientación transversal (W), cuando las líneas de adhesivo son transversales al claro del panel.**

**Un panel estructural con núcleo con orientación L presenta mayor resistencia al esfuerzo cortante generado por flexión que un panel similar con núcleo con orientación W.**

**En consecuencia, la resistencia al esfuerzo cortante y el módulo al esfuerzo cortante se expresan con relación al plano TL ó al plano TW.**

**Se debe observar éste hecho particularmente cuando se proyecta un panel perimetralmente apoyado, en el que se debe considerar la resistencia al corte en ambos sentidos.**

**En los núcleos celulares con celdillas exagonales:**

**El módulo de elasticidad al cortante en la dirección W es un 40 % del módulo de elasticidad al cortante en la dirección L.**

**La resistencia al cortante en la dirección W es un 50 % de la resistencia al cortante en la dirección L.**

## PROPIEDADES MECANICAS DE NUCLEOS CELULARES

PROPIEDAD	ORIENTACION	Kg / Cm <sup>2</sup>	
		60 - 20 - 40 *	125 - 35 - 20 *
Resistencia a compresión		5.27	21.09
Resistencia a tensión		14.06	31.64
Resistencia al cortante	T W	2.67	9.84
	T L	4.57	20.39
Módulo de elasticidad	T W	210.90	492.10
	T L	527.25	1 406.00

Determinadas según MIL - STD - 401

\* Núcleos celulares fabricados por Douglas Aircraft.

## ADHESIVOS

### TERMINOLOGIA

**ADHERENCIA:** conjunto de acciones mecánicas e intermoleculares, que mantienen unida a una capa de adhesivo fraguado con la superficie de un adherente.

**ADHERENCIA MECANICA:** la debida a que el adhesivo penetra en los poros y fisuras de los adherentes.

**ADHERENCIA QUIMICA:** la debida a la acción de las fuerzas intermoleculares entre el adhesivo y los adherentes.

**ADHESIVO:** substancia capaz de unir a dos cuerpos sólidos por acción superficial.

**ADHERENTE:** cuerpo sólido que es unido a otro por medio de un adhesivo.

**ADSORCION:** fijación superficial de un fluido sobre un sólido, sin combinación química.

**CADUCIDAD:** tiempo que un adhesivo puede ser almacenado a una temperatura especificada permaneciendo en buenas condiciones.

**CARGA:** substancia inerte que se añade a un adhesivo para mejorar sus propiedades (estabilidad, resitencia, viscosidad, etc.) y/o para bajar su costo.

**CATALIZADOR:** sustancia que mezclada con el adhesivo en baja proporción, produce un apreciable incremento en la velocidad de curado.

**COHESION:** fuerzas intermoleculares que mantienen unidas a las moléculas de un cuerpo.

**CONTENIDO DE SOLIDOS:** porcentaje en peso de los componentes no volátiles de un adhesivo.

**CURADO:** reacción química que cambia las propiedades físicas de un adhesivo, generalmente acelerada por la acción de calor y/o un catalizador.

**ELASTOMERO:** material que a la temperatura ambiente puede ser estirado repetidamente, al menos hasta alcanzar el doble de su longitud original y que al cesar el esfuerzo recobra aproximadamente su longitud inicial.

**FRAGUADO:** endurecimiento de un adhesivo por acción física ó química (evaporación de solventes, polimerización, oxidación, vulcanización, gelación).

**PESO MOLECULAR:** es la suma de los pesos atómicos de los elementos que forman la molécula.

**PLASTIFICANTE:** sustancia o mezcla de sustancias que se añade a un adhesivo para controlar su grado de dureza.

**POLARIDAD MOLECULAR:** propiedades electrostáticas de una molécula derivadas de su composición atómica.

**PROPIEDADES REOLOGICAS:** flujo y deformación en función del esfuerzo y del tiempo.

**RESISTENCIA DEL ADHESIVO:** esfuerzo necesario para hacer fallar la unión en el plano del adhesivo, por tensión o por fuerza cortante.

**SELLADOR:** substancia que se aplica a la superficie del adherente, antes de aplicar el adhesivo, para mejorar el funcionamiento de la unión.

**SOLVENTE:** líquido en el que se disuelve o dispersa un adhesivo en polvo.

**TERMOFIJO:** adhesivo que después de curado no se reblandece por calentamiento.

**TERMOPLASTICO:** adhesivo que después de curado se reblandece por calentamiento y se endurece por enfriamiento repetidamente.

**VIDA UTIL:** tiempo que un adhesivo permanece en buenas condiciones para ser usado después de ser mezclado con solventes o catalizadores.

**VISCOSIDAD:** resistencia de un líquido a fluir debido a la fricción entre sus moléculas (fricción interna).

**VULCANIZACION:** reacción química de un hule con una substancia adecuada (generalmente azufre), que disminuye el flujo plástico, elimina la adherencia superficial y aumenta la resistencia a la tensión.

## **POLARIDAD MOLECULAR**

La polaridad de una molécula depende de las cargas electrostáticas derivadas de su composición atómica.

La polaridad molecular puede ser:

- Nula (no polar)
- Activa positiva
- Activa negativa
- Activa positiva-negativa

Las moléculas de sustancias con polaridad activa positiva, se adhieren fuertemente a las moléculas de sustancias con polaridad activa negativa.

Las moléculas de sustancias con polaridad activa positiva y las de sustancias con polaridad activa negativa, se adhieren con las de polaridad activa positiva-negativa y con las no polares.

Las moléculas de una sustancia con polaridad activa positiva-negativa, no se adhieren a las moléculas de una sustancia no polar, porque las moléculas con polaridad activa positiva-negativa se atraen entre si fuertemente y no encuentran una acción electrostática de las moléculas no polares.

Los metales no son polares por sí mismos, pero son fuertemente polarizables si una carga electrostática se aproxima a su superficie, de ello resulta que las sustancias con polaridad activa se adhieren bien a las superficies metálicas.

## **PRESENTACION DE LOS ADHESIVOS**

Líquido

Pasta

Película sustentada

Estas presentaciones se pueden usar por separado o combinadas, para obtener las propiedades de resistencia deseadas.

## **ADHESIVOS LIQUIDOS**

Se aplican al núcleo y a las cubiertas con aspersor, con rodillo o con equipo combinado.

Los tipos más comunmente empleados son:

Polivinil butiral—fenólico

Latex sintético—fenólico

Resorcinol

Epóxico

## **ADHESIVOS EN PASTA**

Se aplican a las cubiertas con espátula.

Los tipos mas comunmente usados son:

Epóxico

Poliamida

Poliester

Fenólico—epóxico



## **ADHESIVOS EN PELICULA SUSTENTADA**

**Consisten en una tela de fibra de vidrio, nylon o algodón impregnada en resina de tipo latex sintético-fenólico o epoxi-fenólico.**

## **CLASIFICACION DE ADHESIVOS**

- 1. POR SU USO**
  - a. Estructurales
  - b. Uso general
  
- 2. POR SUS PROPIEDADES DESPUES DEL CURADO**
  - a. Termofijos
  - b. Termoplásticos
  - c. Elastomeros
  
- 3. POR SU FORMA DE FRAGUADO**
  - a. Por evaporación del solvente
  - b. Por reacción química
  - c. Por enfriamiento
  
- 4. POR SU ORIGEN**
  - a. Naturales
  - b. Sintéticos

## **PROPIEDADES FISICAS IMPORTANTES DE UN ADHESIVO**

Resistencia a la tensión.

Resistencia al deslizamiento (fluencia).

Resistencia al desprendimiento.

La resistencia a la tensión estabiliza las cubiertas, evitando que se ondulen.

La resistencia al deslizamiento (fluencia) evita el corrimiento de las cubiertas respecto al núcleo, permitiendo que el esfuerzo cortante se transmita del núcleo a las cubiertas y generando la rigidez a la flexión del panel.

La resistencia al desprendimiento evita la propagación de una zona en la que las cubiertas no están adheridas al núcleo (por defecto de fabricación o por daño posterior).

## **ENERGIA DE ADHERENCIA**

La energía de adherencia de un adhesivo se modifica a partir de su aplicación debido a:

Evaporación del solvente.

Reacción química.

Solidificación del adhesivo por enfriamiento.

## **TIPOS DE FALLA DE UNA UNION POR ADHESIVO**

### **1. FALLA DE ADHERENCIA**

Ocurre en la superficie de contacto del adhesivo con el adherente.

La superficie del adherente queda casi totalmente libre de adhesivo.

### **2. FALLA DE COHESION**

Ocurre en el adhesivo.

Las superficies de los adherentes quedan cubiertas con adhesivo.

### **3. FALLA DEL ADHERENTE**

Ocurre en el adherente.

El adhesivo queda cubierto con material del adherente que falló.

## **FACTORES QUE AFECTAN LA RESISTENCIA DE UNA UNION CON ADHESIVO.**

### **1. FACTORES FISICOS**

- a. Del adhesivo**
  - Tensión superficial
  - Viscosidad
  - Entrampamiento de solventes y/o aire.
  - Temperatura
  
- b. De los adherentes**
  - Porosidad
  
- c. Del adhesivo y los adherentes**
  - Espesor
  - Resistencia y módulo a la tensión
  - Resistencia y módulo al cortante
  - Relación de Poisson
  - Coeficiente de dilatación térmica
  - Propiedades reológicas

### **2. FACTORES QUIMICOS**

- a. Del adhesivo**
  - Peso molecular
  - Proceso de polimerización (formación de productos alternos, contracción).
  - Adsorción de gases
  
- b. De los adherentes**
  - Contaminación
  
- c. Del adhesivo y de los adherentes**
  - Polaridad

## **AGENTES QUE ACTUAN SOBRE EL ADHESIVO DE UN PANEL DURANTE SU OPERACION.**

La degradación que puede sufrir una unión con adhesivo depende de la intensidad y duración de su exposición a agentes nocivos.

### **1. AGENTES NATURALES (INTEMPERISMO)**

- Humedad
- Sales naturales (especialmente Na Cl y salitre).
- Variaciones de temperatura.
- Radiaciones
  - Ultravioletas
  - Infrarrojas
  - Rayos X
  - Cósmicas

### **2. AGENTES INDUCIDOS**

Debidos a la operación de la estructura o vehículo

- Vibración
- Calentamiento
- Gases de combustión.
- Partículas ionizadas
- Derrames de líquidos (combustibles, lubricantes,...)

## **VENTAJAS PRINCIPALES DE LAS UNIONES CON ADHESIVO**

1. Unir materiales de distinta naturaleza.
2. Utilizar materiales laminados muy delgados.
3. Obtener superficies sin discontinuidades, cordones o protuberancias.
4. Distribuir el esfuerzo en la unión minimizando las concentraciones y evitando la fatiga del material.
5. Bajo peso.
6. Elevación de la temperatura en el proceso de la unión relativamente baja.
7. Ejecución sencilla, permitiendo emplear mano de obra medianamente calificada.

## **REGLAS BASICAS PARA OBTENER UNA BUENA UNION POR ADHESIVO.**

1. El adhesivo debe mojar al adherente.
2. Los esfuerzos residuales que se introduzcan durante el fraguado del adhesivo, no deben romper la unión.

## CONSIDERACIONES PARA SELECCIONAR UN ADHESIVO

1. Materiales que se unirán
2. Condiciones de operación (especialmente temperatura y vibración).
3. Condiciones de carga.
4. Condiciones ambientales.
5. Requisitos de estabilidad dimensional.
6. Requisitos de fabricación
7. Duración

## ADHESIVOS PARA PANELES ESTRUCTURALES

Se recomiendan:

Polivinil-butiral-fenólico  
Epoxi

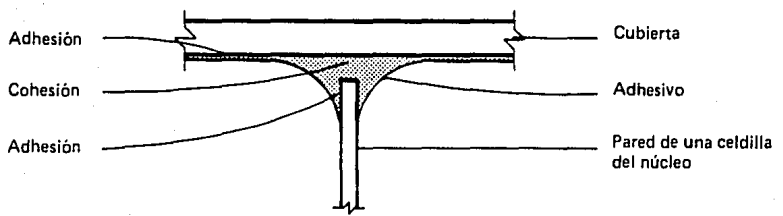
## ADHESIVO POLIVINIL-BUTIRAL-FENOLICO

Es una mezcla de resinas termofijas y termoplásticas que desarrollan una resistencia al cortante de 175 Kg/cm<sup>2</sup> medida en especímenes de aluminio con un translape de 1.27 cm.

Presenta excelente adherencia con los materiales para cubierta más comunes: aluminio, acero, plástico, plástico reforzado con fibra de vidrio, materiales lignocelulósicos, madera, asbestocemento y es perfectamente compatible con el núcleo celular de papel impregnado en resinas fenólicas.

Su resistencia no se afecta por la exposición a temperaturas hasta de 82° C ó a la intemperie por largo tiempo bajo severas condiciones climáticas.





## **DISEÑO**

**Diseñar un panel estructural es definir el material y las dimensiones de cada uno de los elementos que lo integran, para obtener un buen funcionamiento en los aspectos:**

**mecánico  
térmico  
acústico  
de resistencia al fuego  
de resistencia de intemperismo**

**con el menor costo posible.**

## **NOTACION**

<b>A</b>	Area de la sección recta Area de la sección normal al flujo Area de la superficie emisora de energía térmica radiante
<b>a</b>	Largo del panel Longitud de columna
<b>b</b>	Ancho del panel
<b>C</b>	Fuerza de compresión
<b>C<sub>a</sub></b>	Velocidad del sonido en el aire
<b>c</b>	Distancia del plano neutro a la fibra más alejada
<b>D</b>	Rigidez a la flexión
<b><math>\bar{D}</math></b>	Rigidez a la flexión / unidad de ancho
<b>d</b>	Espesor del panel Peralte de la viga Espesor en la dirección del flujo calorífico
<b>E</b>	Módulo de elasticidad a tensión ó compresión (Módulo de Young)
<b>E'</b>	Módulo de elasticidad efectivo a tensión ó compresión.

<b>e</b>	<b>Espesor de las paredes de las celdillas</b> <b>Poder emisivo de una superficie</b>
<b>f</b>	<b>Esfuerzo de tensión o compresión</b> <b>Frecuencia</b> <b>Factor de forma</b>
<b>G</b>	<b>Módulo de elasticidad al esfuerzo cortante</b>
<b>G'</b>	<b>Módulo de elasticidad efectivo al esfuerzo cortante</b>
<b>H</b>	<b>Coefficiente de convección</b>
<b>h</b>	<b>Distancia entre los centroides de las cubiertas</b>
<b>I</b>	<b>Momento de inercia con respecto al eje neutro</b> <b>Intensidad de la corriente eléctrica</b>
<b>K</b>	<b>Constante</b> <b>Conductividad térmica</b>
<b>K<sub>r</sub></b>	<b>Coefficiente de reflexión</b>
<b>K<sub>t</sub></b>	<b>Coefficiente de transmisión</b>
<b>l</b>	<b>Claro</b> <b>Longitud del cuerpo que vibra</b>
<b>M</b>	<b>Momento flexionante</b>
<b>m</b>	<b>Masa</b>

<b>m</b>	Distancia de un punto de carga al apoyo más próximo
<b><math>\bar{m}</math></b>	Masa / unidad de área
<b>n</b>	Número de medias ondas que se forman al producirse el pandeo
<b>P</b>	Carga concentrada Carga total = $p \cdot a$
<b>p</b>	Carga / unidad de longitud
<b>Q</b>	Cantidad de calor transmitido en la unidad de tiempo
<b>R</b>	Energía térmica radiante emitida en la unidad de tiempo
<b>r</b>	Radio Resistencia al paso de la energía eléctrica ó calorífica
<b>S</b>	Módulo de sección
<b>s</b>	Diámetro del círculo inscrito en las celdillas del núcleo
<b>T</b>	Par Temperatura absoluta
<b>t</b>	Espesor de una cubierta
<b><math>t_n</math></b>	Espesor del núcleo

U	Rígidez al esfuerzo cortante
$\bar{U}$	Rígidez al esfuerzo cortante / unidad de ancho
u	Velocidad de propagación de la onda
V	Fuerza cortante normal a las cubiertas Diferencia de potencial
v	Esfuerzo cortante
w	Peso / unidad de área
x	Abscisa Eje de las abscisas
y	Ordenada Eje de las ordenadas
z	Cota Eje de las cotas
$\delta$	Flecha
$\epsilon$	Alargamiento ó acortamiento unitario
$\lambda$	$1 - \mu^2$

$\lambda$	Longitud de onda
$\mu$	Módulo de Poisson
$\rho$	Peso volumétrico Radio de giro Resistividad eléctrica
$\sigma$	Constante que depende del sistema de unidades empleado
$\omega$	Carga / unidad de área

## SUBINDICES

Los subíndices indican:

<b>1</b>	Ligado a la cubierta 1 ó a la superficie emisora
<b>2</b>	Ligado a la cubierta 2 ó a la superficie receptora
<b>b</b>	En el punto cedente
<b>c</b>	Ligado a las cubiertas
<b>cr</b>	Crítico

<b>L</b>	<b>Dirección paralela a las líneas de adhesivo</b>
<b>n</b>	<b>Ligado al núcleo</b>
<b>n<sub>1</sub></b>	<b>Ligado a las paredes de las celdillas del núcleo</b>
<b>n<sub>2</sub></b>	<b>Ligado al material que ocupa las celdillas del núcleo</b>
<b>T</b>	<b>Dirección normal al plano L – W (dirección normal a las cubiertas)</b>
<b>u</b>	<b>último</b>
<b>W</b>	<b>Dirección normal a las líneas de adhesivo ( dirección de la expansión del núcleo celular )</b>
<b>x</b>	<b>En el punto de abscisa <math>x</math> ó paralelo al eje <math>x</math>.</b>
<b>y</b>	<b>En el punto de ordenada <math>y</math> ó paralelo al eje <math>y</math>.</b>
<b>z</b>	<b>En el punto de cota <math>z</math> ó paralelo al eje <math>z</math></b>



## DISEÑO ESTRUCTURAL

### PANELES ESTRUCTURALES

Se debe considerar estructural todo panel cuya falla afecta la estabilidad de una estructura o la seguridad de sus usuarios.

Una edificación se puede diseñar:

- 1.- Con paneles estructurales exclusivamente.
- 2.- Con estructura y paneles estructurales que contribuyen a la rigidez de la estructura.
- 3.- Con estructura y paneles estructurales que no contribuyen a la rigidez de la estructura (los paneles transmiten sus cargas a la estructura pero no trabajan solidariamente con ella).

## **CARGAS**

Las cargas pueden ser permanentes, cíclicas u ocasionales.

### **CARGAS PERMANENTES**

Dependiendo de las propiedades reológicas del adhesivo empleado tienden a producir deslizamiento de las cubiertas respecto al núcleo.

### **CARGAS CICLICAS**

Las cargas cíclicas o repetitivas pueden tener origen mecánico o sónico y tienden a producir fatiga en el material.

La falla por fatiga se inicia en los puntos de concentración de esfuerzo.

Las estructuras formadas por paneles estructurales minimizan la concentración de esfuerzo y en consecuencia son las más aptas para resistir cargas cíclicas.

### **CARGAS OCASIONALES**

Son cargas de corta duración que se presentan en forma aleatoria, debidas principalmente a viento, sismo o impacto.

Las cargas de impacto son concentradas y de corta duración, se pueden presentar durante el montaje ó durante la operación.

El área del panel en la que se distribuye una carga concentrada es proporcional a la rigidez de la cubierta.

## **COEFICIENTE DE SEGURIDAD**

El coeficiente de seguridad indica la relación entre la carga última y la carga de trabajo.

## **COEFICIENTES DE SEGURIDAD EMPLEADOS EN EL DISEÑO DE PANELES**

Para cargas permanentes	2.5
Para cargas cíclicas	3.0
Para cargas de impacto	4.0

El diseño de paneles se hace al límite para una carga última igual a la carga de trabajo multiplicada por el coeficiente de seguridad.

## **CONCEPTOS BASICOS PARA LA EDIFICACION CON PANELES ESTRUCTURALES**

En el caso más general, un panel estructural debe tener capacidad para soportar 3 tipos de cargas:

1. Cargas que actúan normalmente a las cubiertas tratando de flexionar al panel (cargas por viento, cargas de piso).
2. Cargas que actúan paralelamente a las cubiertas tratando de comprimir al panel de canto (cargas de muro).
3. Pares de cargas cuyo plano es paralelo a las cubiertas, que tratan de descuadrar al panel (cargas por sismo).

## **DISEÑO ESTRUCTURAL DE PANELES**

Las investigaciones para desarrollar la teoría de diseño y las aplicaciones prácticas de paneles estructurales, han sido realizadas principalmente por la industria aeronáutica con objeto de disponer de elementos estructurales con una alta relación de resistencia y rigidez respecto a su peso.

En la obtención de las fórmulas para diseño de paneles estructurales se han empleado métodos energéticos, porque la solución de las ecuaciones diferenciales que se plantean utilizando otros métodos resulta sumamente complicada.

El diseño de paneles estructurales se basa en el principio de que en un elemento estructural compuesto, los esfuerzos se distribuyen proporcionalmente a las rigideces de sus componentes.

En un diseño balanceado de un panel estructural, simultáneamente el núcleo alcanza el esfuerzo cortante límite y las cubiertas el esfuerzo en el punto cedente.

## **DIFERENCIAS EN EL DISEÑO DE UN PANEL Y DE UNA PLACA HOMOGENEA**

1.- En los núcleos celulares, para un determinado material, los valores de:

- Resistencia a la compresión.
- Módulo de elasticidad a la compresión.
- Resistencia al esfuerzo cortante generado por flexión.
- Módulo de elasticidad al cortante.

varían con el espesor del núcleo y con la temperatura.

2.- Al diseñar un panel se debe considerar la deformación por esfuerzo cortante. Los núcleos para paneles estructurales (espumas rígidas y material celular) generalmente tienen un bajo módulo de elasticidad al esfuerzo cortante y en consecuencia la deformación por esfuerzo cortante no es despreciable.

3.- Temperaturas diferentes en las cubiertas de un panel generan dilataciones distintas que inducen esfuerzo cortante en el núcleo.

4.- Al diseñar un panel se deben considerar fenómenos de inestabilidad que no se presentan en una placa, pero que son factibles en un panel:

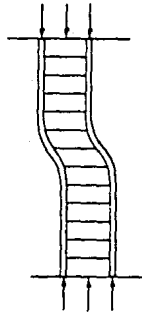
- Plegamiento.
- Ondulamiento.
- Formación de hoyuelos o ampollas.

## **CAUSAS DE FALLA DE UN PANEL ESTRUCTURAL**

1. Tensión o compresión en las cubiertas
2. Aplastamiento del núcleo, debido a compresión normal a las cubiertas.
3. Cortante en el núcleo, generado por flexión del panel.
4. Cortante paralelo a las cubiertas, en el adhesivo.
5. Inestabilidad general
  - a. Pandeo ( $n = 1$ )
  - b. Plegamiento ( $n \rightarrow \infty$ )
  - c. Corrimiento de las cubiertas respecto al núcleo, debido a bajo módulo de elasticidad al cortante del adhesivo.
6. Inestabilidad local
  - a. Ondulamiento
  - b. Formación de hoyuelos o ampollas.

## PLEGAMIENTO

El plegamiento de un panel se produce al fallar el núcleo por esfuerzo cortante.



Para incrementar la resistencia al plegamiento de un panel, se aumenta el espesor y/o la resistencia al esfuerzo cortante del núcleo.

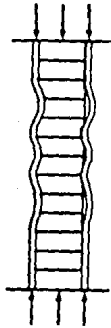
## ONDULAMIENTO

El ondulamiento se presenta en cubiertas sujetas a compresión debido a:

- Deficiente apoyo de las cubiertas sobre el núcleo por bajo módulo de elasticidad del núcleo a compresión normal a las cubiertas.

- Falla del adhesivo o del núcleo por tensión normal a las cubiertas.

El núcleo actúa como una base elástica sobre el que se apoyan las cubiertas que no son perfectamente planas (tienen ondulamiento inicial)



El ondulamiento ocurre cuando el esfuerzo a compresión de las cubiertas alcanza el valor:

$$f_{cr} = Q \left( \frac{E_c E_n G_n}{1 - \mu_c^2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Q = Parámetro que es función de q y k



$$q = \frac{\tau_n G_n}{t} \left( \frac{1 - \mu_c^2}{E_c E_n G_n} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$k = \frac{E_n}{t_n f} \delta_0$$

$f =$  el menor de:

resistencia a la tensión del adhesivo

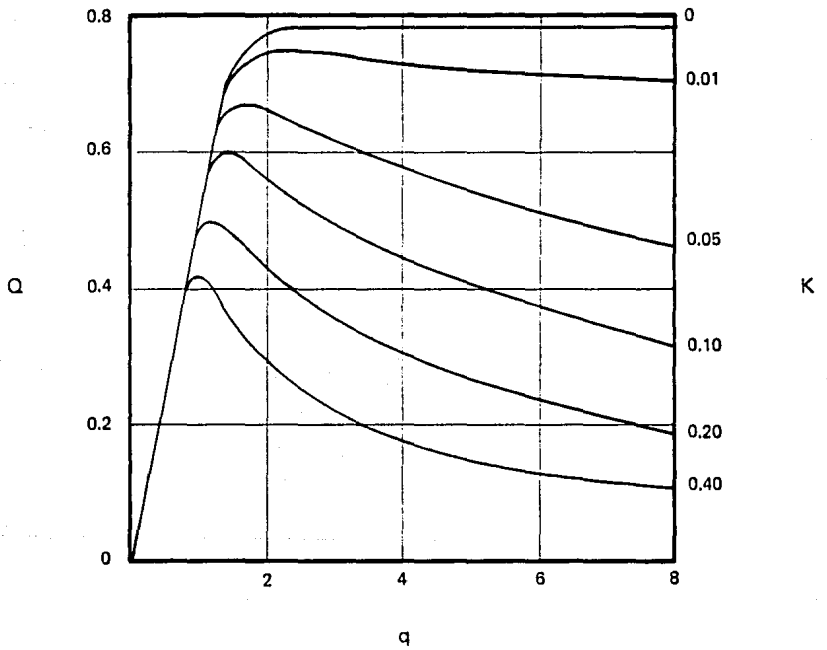
resistencia a la tensión del núcleo

resistencia a la compresión del núcleo

$\delta_0 =$  amplitud del ondulamiento inicial en las cubiertas.

**No existe alguna teoría completamente segura para diseño por ondulamiento**

**PARAMETRO PARA DETERMINAR EL ESFUERZO CRITICO QUE  
GENERA EL ONDULAMIENTO DE LAS CUBIERTAS DE UN PANEL**

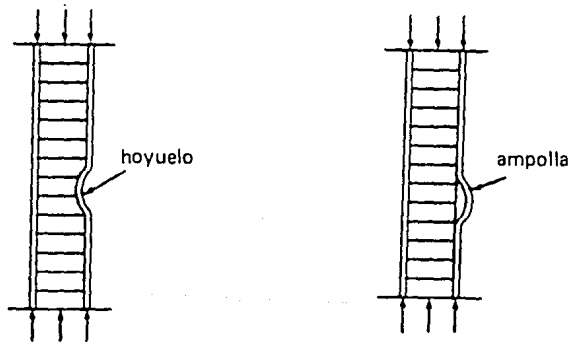


## FORMACION DE HOYUELOS O AMPOLLAS

No es propiamente una falla, pero puede precipitar la falla por ondulamiento.

Un hoyuelo se forma cuando una pequeña zona de la cubierta se abomba hacia adentro.

Una ampolla se forma cuando una pequeña zona de la cubierta se abomba hacia afuera.



La formación de hoyuelos o ampollas ocurre cuando el esfuerzo de compresión de las cubiertas alcanza el valor:

$$f_{cr} = \frac{2 E_c}{1 - \mu_c^2} \left( \frac{t}{s} \right)^2$$

**El panel es capaz de soportar una carga mayor que la que produce el esfuerzo crítico que genera la formación de hoyuelos o ampollas, pero no se dispone de algún procedimiento confiable para predecir la falla.**

**Para incrementar la resistencia a la formación de hoyuelos o ampollas, se aumenta el espesor de las cubiertas o se reduce el tamaño de las celdillas del núcleo.**

**En paneles con cubiertas muy delgadas y núcleo celular, debido a los esfuerzos inducidos durante la fabricación, es posible que los bordes de las celdillas se marquen en las cubiertas formando seudo-hoyuelos.**

**El funcionamiento de éstos paneles debe comprobarse experimentalmente.**

## **FALLA DE UN PANEL ORIGINADA EN LAS CUBIERTAS**

**Las cubiertas debidamente estabilizadas por el núcleo y el adhesivo para evitar pandeo, plegamiento, ondulamiento y formación de hoyuelos o ampollas pueden soportar esfuerzos superiores al límite elástico.**

**Experimentalmente se ha encontrado que la falla de un panel se origina en las cubiertas cuando el esfuerzo en las cubiertas sobrepasa el punto cedente (esfuerzo de fluencia).**

## **ANALOGIA**

**Existe una evidente analogía entre una viga I y un panel estructural.**

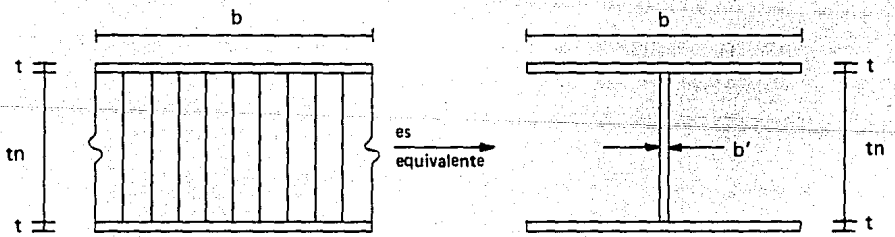
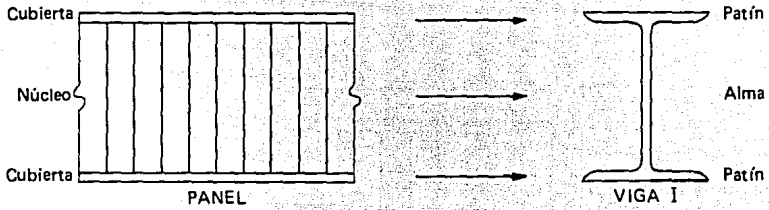
**1. En la forma como trabajan a la flexión:**

**Los patines de la viga I y las cubiertas del panel resisten principalmente las fuerzas de tensión y compresión que genera la flexión.**

**El alma de la viga I y el núcleo del panel resisten principalmente la fuerza cortante.**

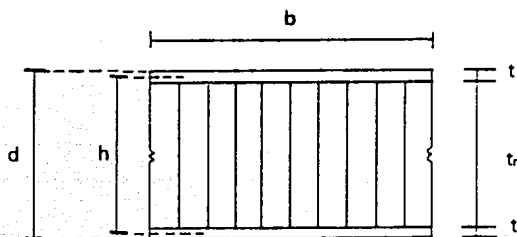
**2. En el objetivo del diseño:**

**En ambos diseños se busca obtener una alta relación entre la rigidez a la flexión y el peso, aprovechando eficientemente el material destinado a resistir la tensión y la compresión colocándolo alejado del plano neutro para tener valores altos del momento de inercia y del módulo de sección.**



$$b' = b \frac{E_n}{E_c}$$

## PROPIEDADES DE LA SECCION TRANSVERSAL DE UN PANEL ESTRUCTURAL



### MOMENTO DE INERCIA

$$I = \frac{b (d^3 - t_n^3)}{12}$$

En los paneles típicos, las cubiertas son muy delgadas respecto al espesor del panel, lo que permite obtener fórmulas para diseño simplificadas (no exactas)

$$I = I_0 + 2bt \left(\frac{h}{2}\right)^2$$



$$I_o \doteq 0$$

$$\frac{h}{2} \doteq \frac{d}{2}$$

$$I \doteq 0 + 2bt \left( \frac{d}{2} \right)^2$$

$$I \doteq \frac{btd^2}{2}$$

#### MODULO DE SECCION

$$S = \frac{I}{y_{max}}$$

$$S = \frac{b (d^3 - t_n^3)}{12} : \frac{d}{2}$$

$$S = \frac{b (d^3 - t_n^3)}{6d}$$

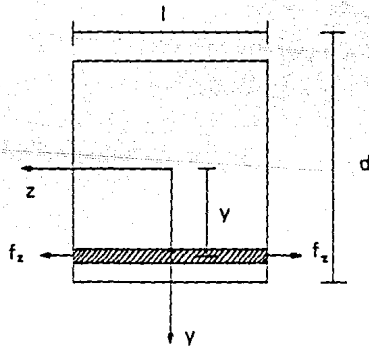
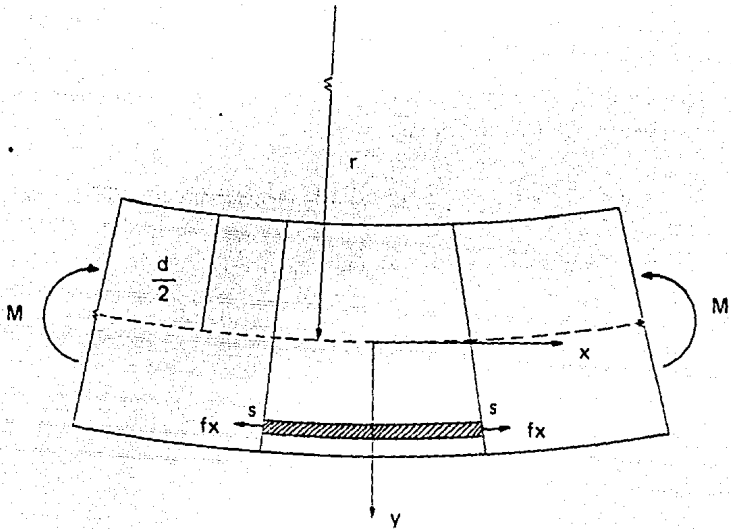
$$S \doteq \frac{btd^2}{2} : \frac{d}{2}$$

$$S \doteq btd$$

## MODULO DE ELASTICIDAD AL CORTANTE DE MATERIALES ISOTROPICOS

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)}$$

## RIGIDEZ A LA FLEXION DE UNA PLACA



Sea una placa rectangular que se flexiona formando una superficie cilíndrica de radio  $r$ . considérese una faja de ancho unitario y luz  $l$ .

Una lámina longitudinal de la placa, tal como la  $S - S$ , sufre un esfuerzo longitudinal  $f_x$  y un esfuerzo transversal  $f_z$

El esfuerzo transversal  $f_z$  se opone a la contracción lateral de la lámina

El alargamiento unitario en la dirección  $x$  es:

$$\epsilon_x = \frac{f_x}{E} - \mu \frac{f_z}{E} \quad (1)$$

La contracción unitaria en la dirección  $z$  es:

$$\epsilon_z = \frac{f_z}{E} - \mu \frac{f_x}{E} = 0 \quad (2)$$

De (2):

$$\frac{f_z}{E} = \mu \frac{f_x}{E}$$

Sustituyendo en (1):

$$\epsilon_x = \frac{f_x}{E} - \mu^2 \frac{f_x}{E}$$
$$\epsilon_x = \frac{f_x}{E} (1 - \mu^2) \quad (3)$$

$$(1 - \mu^2) = \lambda \quad (4)$$

Sustituyendo (4) en (3):

$$\epsilon_x = \frac{f_x}{E} \lambda \quad (5)$$

Suponiendo que las secciones transversales de la placa permanecen planas durante la deformación.

$$\epsilon_x = \frac{y}{r} \quad (6)$$

Sustituyendo (6) en (5):

$$\frac{y}{r} = \frac{f_x}{E} \lambda$$
$$f_x = \frac{E}{r \lambda} y \quad (7)$$

El momento flexionante en una sección transversal de la faja de ancho unitario es:

$$\bar{M} = \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} f_x y \, dy \quad (8)$$

Sustituyendo (7) en (8):

$$\bar{M} = \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} \frac{E}{r \lambda} y^2 dy$$

$$\bar{M} = \frac{E}{r \lambda} \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} y^2 dy$$

$$\bar{M} = \frac{E d^3}{12 r \lambda} \quad (9)$$

$$\frac{1}{r} = \frac{\bar{M}}{\bar{D}}$$

$$\bar{D} = \bar{M} \cdot r \quad (10)$$

Sustituyendo (9) en (10)

$$\bar{D} = \frac{E d^3}{12 \lambda}$$

$\bar{D}$  es la rigidez a la flexión de una placa de ancho unitario

## RIGIDEZ A LA FLEXION DE UNA PLACA DE ANCHO $b$

$$D = \bar{D} b$$

$$D = E \frac{bd^3}{12\lambda}$$

$D$  en las placas es equivalente a  $EI = E \frac{bd^3}{12}$  en las vigas

La rigidez a la flexión por unidad de ancho de una placa ancha (cuando se puede considerar que no hay contracción lateral) es mayor que la de una placa angosta (viga) en la proporción  $\frac{1}{1 - \mu^2} = \frac{1}{\lambda}$

**RIGIDEZ A LA FLEXION DE UN PANEL ESTRUCTURAL ANCHO (TRA-  
BAJANDO COMO PLACA) CON CUBIERTAS IGUALES**

$$D = E_c \frac{b (d^3 - t_n^3)}{12 \lambda_c} + E_n \frac{b t_n^3}{12 \lambda_n}$$

Si se desprecia la rigidez a la flexión del núcleo porque  $E_n$  es mucho menor que  $E_c$  :

$$D \approx E_c \frac{b (d^3 - t_n^3)}{12 \lambda_c} \quad (1)$$

$$d^3 = (t_n + 2t)^3$$

$$d^3 = t_n^3 + 6t_n^2 t + 12t_n t^2 + 8t^3$$

$$d^3 - t_n^3 = 6t_n^2 t + 12t_n t^2 + 8t^3$$

$$d^3 - t_n^3 = 6t_n^2 t + 12t_n t^2 + 6t^3 + 2t^3$$

Despreciando el término  $2t^3$

$$d^3 - t_n^3 = 6t (t_n^2 + 2t_n t + t^2)$$



$$d^3 - t_n^3 = 6t(t_n + t)^2 \quad (2)$$

$$t_n + t = h \quad (3)$$

Sustituyendo (3) en (2) :

$$d^3 - t_n^3 = 6th^2 \quad (4)$$

Sustituyendo (4) en (1) :

$$D = E_c \frac{b \cdot 6th^2}{12 \lambda_c}$$

$$D = E_c \frac{bth^2}{2 \lambda_c}$$

**RIGIDEZ A LA FLEXION DE UN PANEL ESTRUCTURAL ANGOSTO  
( TRABAJANDO COMO VIGA ) CON CUBIERTAS IGUALES**

$$D = E_c \frac{b (d^3 - t_n^3)}{12} + E_n \frac{b t_n^3}{12}$$

Sí se deprecia la rigidez a la flexión del núcleo porque  $E_n$  es mucho mayor que  $E_c$ :

$$D \doteq E_c \frac{b (d^3 - t_n^3)}{12} \quad (1)$$

Anteriormente se demostró que :

$$d^3 - t_n^3 = 6 t h^2 \quad (2)$$

Sustituyendo (2) en (1)

$$D \doteq E_c \frac{b t h^2}{2}$$

**RIGIDEZ A LA FLEXION EN UN PANEL ESTRUCTURAL ANCHO ( TRABAJANDO COMO PLACA ) CON CUBIERTAS DIFERENTES ( DIFERENTE MATERIAL Y/O DIFERENTE ESPESOR )**

Sí se deprecia la rigidez a la flexión del núcleo porque  $E_n$  es mucho menor que  $E_c$

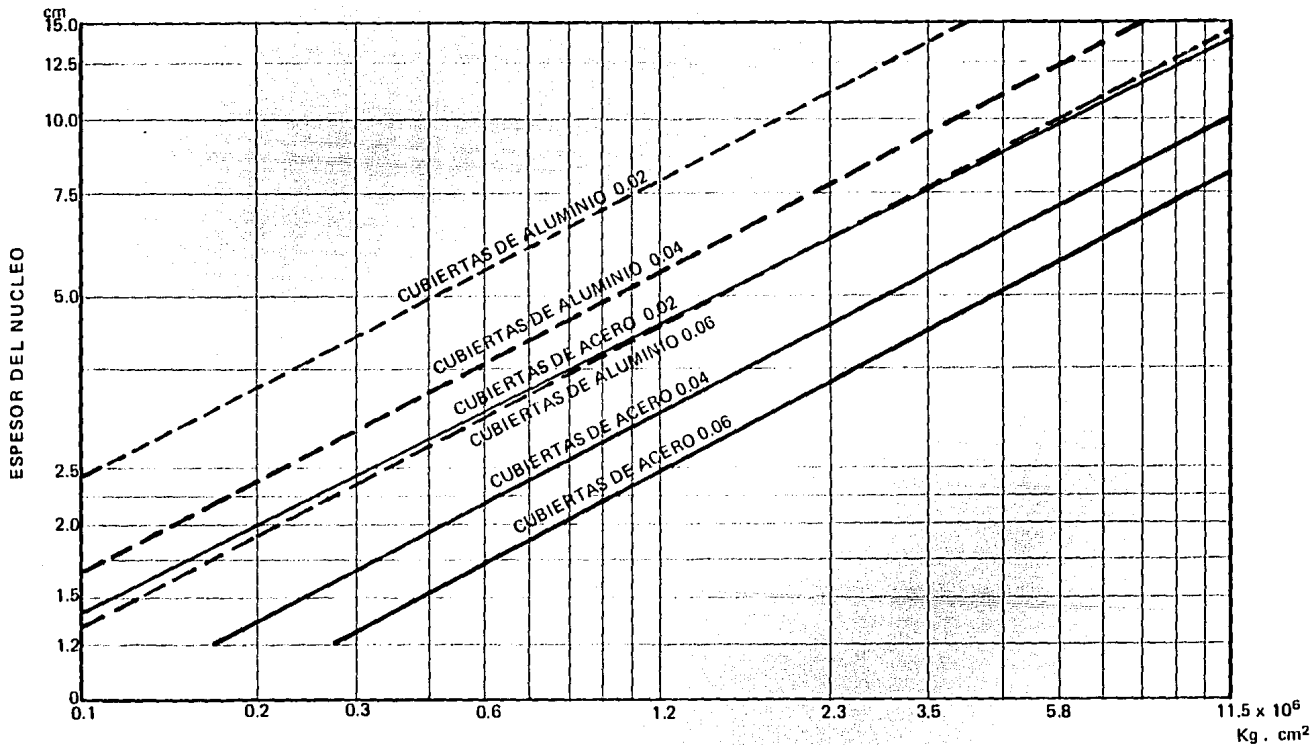
$$D = \frac{E_1 t_1 \cdot E_2 t_2}{E_1 t_1 \lambda_2 + E_2 t_2 \lambda_1} b h^2 + D_c$$

$D_c$  = rigidez a la flexión de las cubiertas consideradas aisladas.

En general es despreciable.

$$D_c = E_1 \frac{bt_1^3}{12 \lambda_1} + E_2 \frac{bt_2^3}{12 \lambda_2}$$

# VARIACION DE LA RIGIDEZ A LA FLEXION CON EL ESPESOR DEL NUCLEO, EN UN PANEL CON NUCLEO CELULAR



RIGIDEZ A LA FLEXION / CM. DE ANCHO DEL PANEL

**RIGIDEZ AL ESFUERZO CORTANTE DE UN PANEL CON CUBIERTAS  
IGUALES Y DELGADAS**

$$U = b \frac{t_n + d}{2} G_n$$

$$U = b \frac{d - 2t + d}{2} G_n$$

$$U = b \frac{2d - 2t}{2} G_n$$

$$U = b (d - t) G_n$$

$$U = b h G_n$$

## FLECHA EN UN PANEL ESTRUCTURAL

La flecha producida por la fuerza cortante en un panel estructural **nó** es despreciable.

La fórmula para calcular la flecha producida por el momento flexionante y por la fuerza cortante en un panel estructural, se obtiene integrando la ecuación diferencial:

$$\frac{d^2 \delta}{dx^2} = - \frac{I}{D} M_x + \frac{I}{U} \frac{d V_x}{dx}$$

y es:

$$\delta = K_M \frac{Pa^3}{D} + K_V \frac{Pa}{U}$$

$K_M$   
 $K_V$  Coeficientes que dependen del sistema de apoyo y carga

El término  $K_M \frac{Pa^3}{D}$  mide la flecha producida por el momento flexionante

El término  $K_V \frac{Pa}{U}$  mide la flecha producida por la fuerza cortante

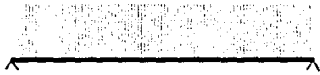
A medida que aumenta el claro, crece la importancia del primer término respecto al segundo.

APOYO Y CARGA

FLECHA MAX EN

$K_m$

$K_v$



centro del claro

$$\frac{5}{384}$$

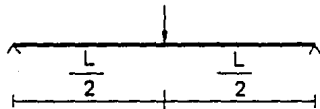
$$\frac{1}{8}$$



centro del claro

$$\frac{1}{384}$$

$$\frac{1}{8}$$



centro del claro

$$\frac{1}{48}$$

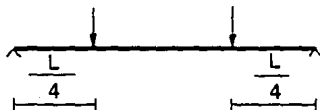
$$\frac{1}{4}$$



centro del claro

$$\frac{1}{192}$$

$$\frac{1}{4}$$



centro del claro

$$\frac{11}{768}$$

$$\frac{1}{8}$$



extremo libre

$$\frac{1}{8}$$

$$\frac{1}{2}$$



extremo libre

$$\frac{1}{3}$$

1

## **PANEL TRABAJANDO A TENSION, CON CARGA UNIFORME PARALELA A LAS CUBIERTAS ACTUANDO EN DOS BORDES PARALELOS**

La carga es soportada casi íntegramente por las cubiertas porque el módulo de elasticidad a la tensión de los núcleos ligeros es muy bajo.

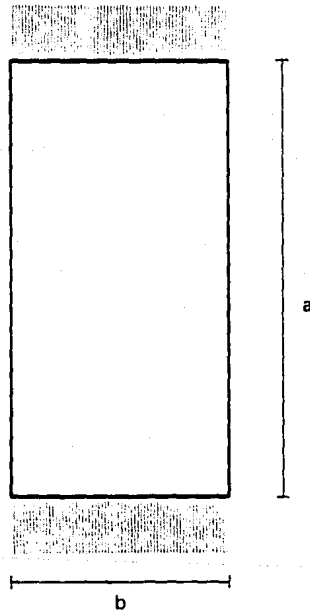
Las cubiertas se diseñan para resistir la tensión.

El núcleo y el adhesivo se diseñan por consideraciones no mecánicas (arquitectónicas, constructivas, de aislamiento térmico ó acústico)

El panel estructural trabajando a tensión es un elemento mecánicamente ineficiente.



**PANEL TRABAJANDO A COMPRESION, CON CARGA UNIFORME PARALELA A LAS CUBIERTAS ACTUANDO EN DOS BORDES PARALELOS**



La carga es soportada casi íntegramente por las cubiertas, porque el módulo de elasticidad a la compresión de los núcleos ligeros es muy bajo.

La función del núcleo y del adhesivo es estabilizar a las cubiertas evitando pandeo, plegamiento u ondulamiento.

Se diseña para que las cubiertas resistan la compresión y se revisa por pandeo, plegamiento, ondulamiento y formación de hoyuelos o ampollas.

### 1.- ESFUERZO DE COMPRESION

$$f_i = \frac{p E_i}{E_1 t_1 + E_2 t_2}$$

$f_i$  = esfuerzo de compresión en la cubierta i.

$E_i$  = módulo de elasticidad de la cubierta i.

i = 1 ó 2.

### 2.- CARGA CRITICA DE PANDEO

Despreciando la rigidez de las cubiertas consideradas aisladamente:

$$P_{cr} = \frac{n^2 \pi^2 \bar{D}}{a^2 \left( 1 + \frac{n^2 \pi^2 \bar{D}}{a^2 \bar{U}} \right)}$$

$$P_{cr} = p_{cr} \cdot b$$

n = modo de pandeo (número de medias ondas que se forman al producirse el pandeo)

La fórmula se puede escribir:

$$p_{cr} = \frac{\pi^2 \bar{D}}{a^2 \left( \frac{1}{n^2} + \frac{\pi^2 \bar{D}}{a^2 \bar{U}} \right)}$$

Para un panel determinado (  $a$ ,  $\bar{D}$ ,  $\bar{U}$  fijos ), la fracción adquiere su valor mínimo cuando el denominador es máximo, lo cual ocurre para  $n = 1$

En consecuencia, la carga crítica mínima se presenta para  $n = 1$

$$p_{cr} (\min) = \frac{\pi^2 \bar{D}}{a^2 + \frac{\pi^2 \bar{D}}{\bar{U}}}$$

La fracción adquiere su valor máximo cuando el denominador es mínimo, lo cual ocurre para  $n = \infty$

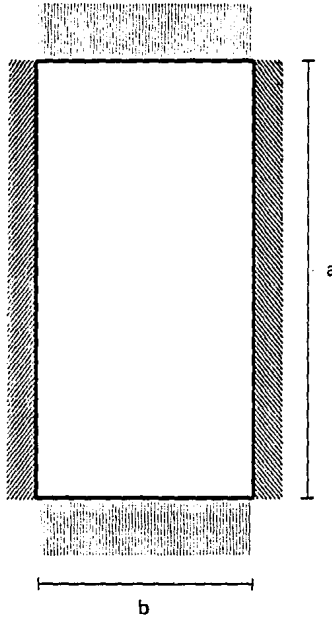
$$p_{cr} (\max) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\pi^2 \bar{D}}{a^2 \left( \frac{1}{n^2} + \frac{\pi^2 \bar{D}}{a^2 \bar{U}} \right)}$$

$$p_{cr} (\max) = \bar{U}$$

Esta carga por unidad de longitud de borde, produce la inestabilidad por cortante.

El panel falla por plegamiento.

**PANEL GUIADO EN DOS BORDES PARALELOS, TRABAJANDO A COMPRESION, CON CARGA UNIFORME PARALELA A LAS CUBIERTAS ACTUANDO EN LOS DOS BORDES PARALELOS NO GUIADOS.**



$$P_{cr} = \frac{4 \pi^2 D}{b^2 \left( 1 + \frac{\pi^2 D}{b^2 U} \right)^2}$$

$P_{cr}$  = carga crítica total

La fórmula es aplicable a paneles en que se cumple

$$a \geq b$$

$$\frac{\pi^2 D}{b^2 U} \leq 1$$

El esfuerzo en las cubiertas se calcula con la expresión

$$f = \frac{P}{2tb}$$

## **PANEL TRABAJANDO A FLEXION**

Cubiertas, núcleo y adhesivo trabajan solidariamente con un plano neutro común.

El núcleo y el adhesivo estabilizan a la cubierta sometida a compresión para evitar ondulamiento ó formación de hoyuelos ó ampoyas.

El momento flexionante genera:

Un par, que por el bajo módulo de elasticidad a tensión ó compresión de los núcleos ligeros es soportado casi íntegramente por las cubiertas, trabajando una a tensión y la otra a compresión.

Compresión normal a las cubiertas, que es soportada por el núcleo.

Cortante, que por el pequeño espesor de las cubiertas es soportado casi íntegramente por el núcleo y que por el bajo módulo de elasticidad al esfuerzo cortante de los núcleos ligeros produce deformaciones que no son despreciables.

Cortante (rasante) que es soportado por la unión con adhesivo.

**Las cubiertas se diseñan para resistir los esfuerzos de tensión y compresión.**

**El núcleo se diseña para resistir el esfuerzo cortante y para obtener el módulo de sección requerido para no exceder la flecha permisible y se revisa por aplastamiento.**

**La unión con adhesivo se revisa por esfuerzo cortante ( rasante )**

**Finalmente, el panel se revisa por ondulamiento y por formación de hoyuelos ó ampollas**

## 1.- ESFUERZOS DE TENSION O COMPRESION EN LAS CUBIERTAS

a. Panel con cubiertas iguales

$$f = \frac{M}{S}$$

$$f = \frac{M}{b t d}$$

$$f_1 = f_2 = \frac{M}{b t d}$$

b. Panel con cubiertas distintas

$$f_1 = \frac{M}{b t_1 d} \left[ 1 + \left( 1 + \frac{E_1 t_1 \lambda_2}{E_2 t_2 \lambda_1} \right) \frac{t_1}{2d} \right]$$
$$f_2 = \frac{M}{b t_2 d} \left[ 1 + \left( 1 + \frac{E_2 t_2 \lambda_1}{E_1 t_1 \lambda_2} \right) \frac{t_2}{2d} \right]$$

$$\lambda = 1 - \mu^2$$



**2.— ESFUERZO DE COMPRESION NORMAL A LAS CUBIERTAS, EN EL NUCLEO.**

**El momento flexionante produce compresión normal a las cubiertas en el núcleo.**

**Generalmente este esfuerzo es pequeño**

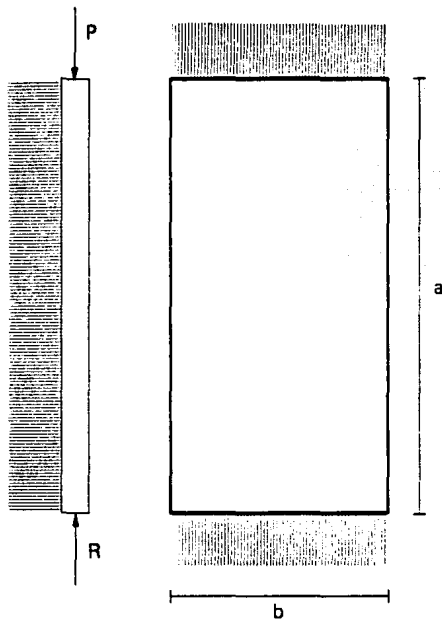
**Una fórmula no exacta para calcularlo es:**

$$f_n = \frac{M^2}{b h D}$$

**3.— ESFUERZO CORTANTE EN EL NUCLEO**

$$v_n = \frac{V}{bh}$$

**PANEL ESTRUCTURAL SOMETIDO A LA ACCION SIMULTANEA DE CARGA UNIFORME NORMAL A LAS CUBIERTAS Y CARGA UNIFORME PARALELA A LAS CUBIERTAS**



Es el caso de un panel de fachada sometido a presión del viento y carga vertical simultáneamente.

El efecto de las cargas combinadas se calcula con base en el efecto de la carga uniforme normal a las cubiertas, incrementado por el efecto de la carga uniforme paralela a las cubiertas de acuerdo con la fórmula siguiente:

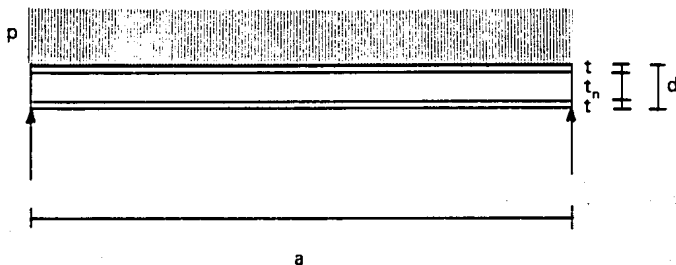
$$\psi = \frac{\psi_0}{1 - \frac{P}{P_{cr}}}$$

$\psi$  = deflexión, momento flexionante, fuerza cortante, esfuerzo, Etc., generado por las cargas combinadas.

$\psi_0$  = idem generado por la carga uniforme normal a las cubiertas.

$P_{cr}$  = carga crítica de pandeo ( paralela a las cubiertas )

## FORMULAS PARA REVISION DE UN PANEL SIMPLEMENTE APOYADO CON CARGA UNIFORME NORMAL A LAS CUBIERTAS



$p$  = carga por unidad de longitud

### MOMENTO FLEXIONANTE MAXIMO

$$M = \frac{p a^2}{8}$$

### FUERZA CORTANTE MAXIMA

$$V = \frac{p a}{2}$$

## ESFUERZO DE TENSION O COMPRESION MAXIMO EN LAS CUBIERTAS

$$f_c = \frac{M}{S} \quad (1)$$

$$M = \frac{pa^2}{8} \quad (2)$$

$$S = b t d \quad (3)$$

Sustituyendo (2) y (3) en (1)

$$f_c = \frac{p a^2}{8 b t d}$$

## ESFUERZO CORTANTE MAXIMO EN EL NUCLEO

$$v_n = \frac{V}{bh} \quad (1)$$

$$V = \frac{pa}{2} \quad (2)$$

Sustituyendo (2) en (1)

$$v_n = \frac{pa}{2 b h}$$

## FLECHA MAXIMA

$$\delta = \frac{5}{384} \frac{Pa^3}{D} + \frac{1}{8} \frac{Pa}{U} \quad (1)$$

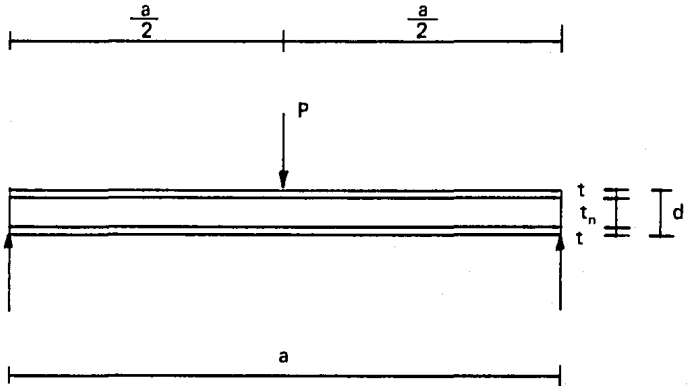
$$P = pa \quad (2)$$

Sustituyendo (2) en (1)

$$\delta = \frac{5}{384} \frac{pa^4}{D} + \frac{1}{8} \frac{pa^2}{U}$$

Es necesario comprobar además que no se excede la capacidad del núcleo al aplastamiento y que no se presentan fenómenos de ondulación ó formación de hoyuelos ó ampollas.

**FORMULAS PARA REVISION DE UN PANEL SIMPLEMENTE APOYADO  
CON CARGA CONCENTRADA EN EL CENTRO DEL CLARO NORMAL A  
LAS CUBIERTAS**



$P$  = carga concentrada

**MOMENTO FLEXIONANTE MAXIMO**

$$M = \frac{Pa}{4}$$

**FUERZA CORTANTE MAXIMA**

$$V = \frac{P}{2}$$

## ESFUERZO DE TENSION O COMPRESION MAXIMO EN LAS CUBIERTAS

$$f_c = \frac{M}{S} \quad (1)$$

$$M = \frac{Pa}{4} \quad (2)$$

$$S = btd \quad (3)$$

Sustituyendo (2) y (3) en (1)

$$f_c = \frac{Pa}{4btd}$$

## ESFUERZO CORTANTE MAXIMO EN EL NUCLEO

$$v_n = \frac{V}{bh} \quad (1)$$

$$V = \frac{P}{2} \quad (2)$$

Sustituyendo (2) en (1)

$$v_n = \frac{P}{2bh}$$

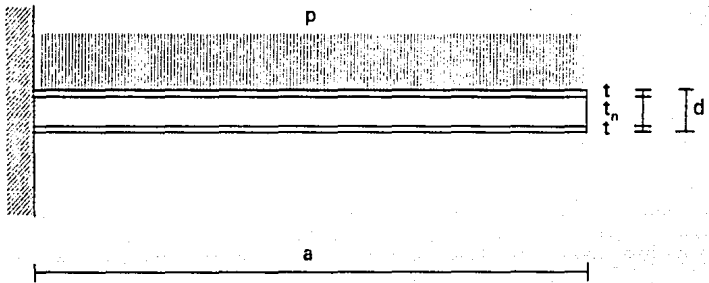


## FLECHA MAXIMA

$$\delta = \frac{1}{48} \cdot \frac{Pa^3}{D} + \frac{1}{4} \cdot \frac{Pa}{U}$$

Es necesario comprobar también que no se excede la capacidad del núcleo al aplastamiento y que no se presentan fenómenos de ondulamiento ó formación de hoyuelos ó ampollas.

**FORMULAS PARA REVISION DE UN PANEL EN VOLADIZO, CON CARGA UNIFORME NORMAL A LAS CUBIERTAS**



$p =$  carga por unidad de longitud

**MOMENTO FLEXIONANTE MAXIMO**

$$M = \frac{pa^2}{2}$$

**FUERZA CORTANTE MAXIMA**

$$V = pa$$

## ESFUERZO DE TENSION O COMPRESION MAXIMO EN LAS CUBIERTAS

$$f_c = \frac{M}{S} \quad (1)$$

$$M = \frac{pa^2}{2} \quad (2)$$

$$S = btd \quad (3)$$

Sustituyendo (2) y (3) en (1):

$$f_c = \frac{pa^2}{2btd}$$

## ESFUERZO CORTANTE MAXIMO EN EL NUCLEO

$$v = \frac{V}{bh} \quad (1)$$

$$V = pa \quad (2)$$

Sustituyendo (2) en (1):

$$v = \frac{pa}{bh}$$

## FLECHA MAXIMA

$$\delta = \frac{1}{8} \frac{Pa^3}{D} + \frac{1}{2} \frac{Pa}{U} \quad (1)$$

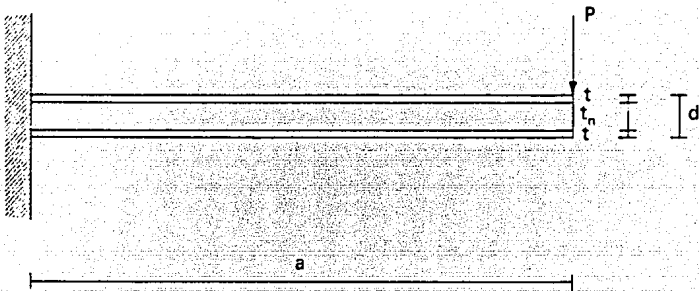
$$P = pa \quad (2)$$

Sustituyendo (2) en (1)

$$\delta = \frac{1}{8} \frac{pa^4}{D} + \frac{1}{2} \frac{pa^2}{U}$$

Es necesario comprobar además que en el empotramiento no se excede la capacidad del núcleo al aplastamiento y que no se presentan fenómenos de ondulación ó formación de hoyuelos ó ampollas.

**FORMULAS PARA REVISION DE UN PANEL EN VOLADIZO, CON CARGA CONCENTRADA NORMAL A LAS CUBIERTAS, APLICADA EN EL EXTREMO LIBRE**



$P$  = carga concentrada

**MOMENTO FLEXIONANTE MAXIMO**

$M$  =  $Pa$

**FUERZA CORTANTE MAXIMA**

$V$  =  $P$

## ESFUERZO DE TENSION O COMPRESION MAXIMO EN LAS CUBIERTAS

$$f_c = \frac{M}{S} \quad (1)$$

$$M = P_a \quad (2)$$

$$S = b t d \quad (3)$$

Sustituyendo (2) y (3) en (1):

$$f_c = \frac{P_a}{b t d}$$

## ESFUERZO CORTANTE MAXIMO EN EL NUCLEO

$$v = \frac{V}{bh} \quad (1)$$

$$V = P \quad (2)$$

Sustituyendo (2) en (1):

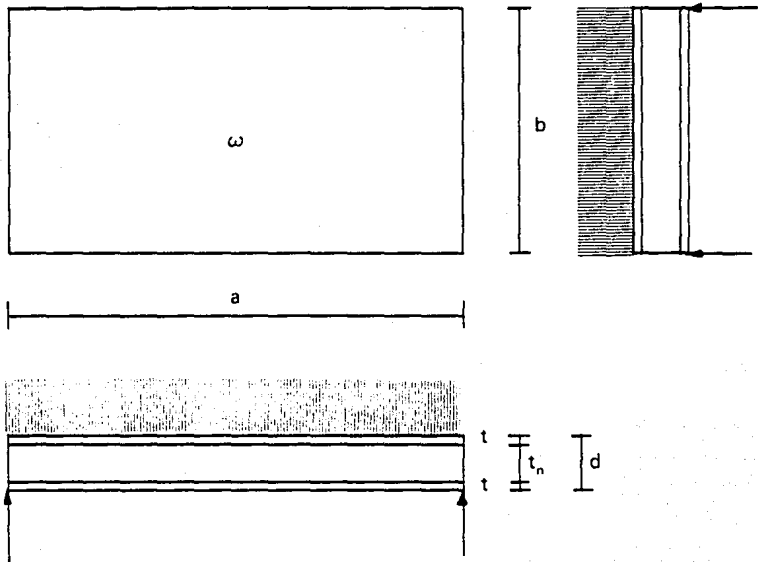
$$v = \frac{P}{bh}$$

## FLECHA MAXIMA

$$\delta = \frac{1}{3} \frac{Pa^3}{D} + \frac{Pa}{U} \quad (1)$$

Es necesario comprobar además que en el empotramiento no se excede la capacidad del núcleo al aplastamiento y que no se presentan fenómenos de ondulamiento ó formación de hoyuelos ó ampollas.

**FORMULAS PARA REVISION DE UN PANEL PERIMETRALMENTE  
APOYADO, CON CARGA UNIFORME NORMAL A LAS CUBIERTAS**



$\omega$  = carga / unidad de área

**MOMENTO FLEXIONANTE MAXIMO**

$$M = \beta \omega b^2$$



## ESFUERZO A TENSION O COMPRESION MAXIMO EN LAS CUBIERTAS

$$f_c = \frac{M}{S} \quad (1)$$

$$M = \beta \omega b^2 \quad (2)$$

$$S = b t d \quad (3)$$

Sustituyendo (2) y (3) en (1):

$$f_c = \frac{\beta \omega b^2}{b t d} = \frac{\beta \omega b}{t d}$$

## ESFUERZO CORTANTE MAXIMO EN EL NUCLEO

$$v = \frac{V}{b h} \quad (1)$$

$$V = \gamma \omega b^2 \quad (2)$$

Sustituyendo (2) en (1):

$$v = \frac{\gamma \omega b^2}{b h} = \frac{\gamma \omega b}{h}$$

## FLECHA MAXIMA

$$\delta = a_1 \frac{\omega b^4}{D} + a_1 a_2 \frac{\omega b^2 \pi^2}{t_n G_n}$$

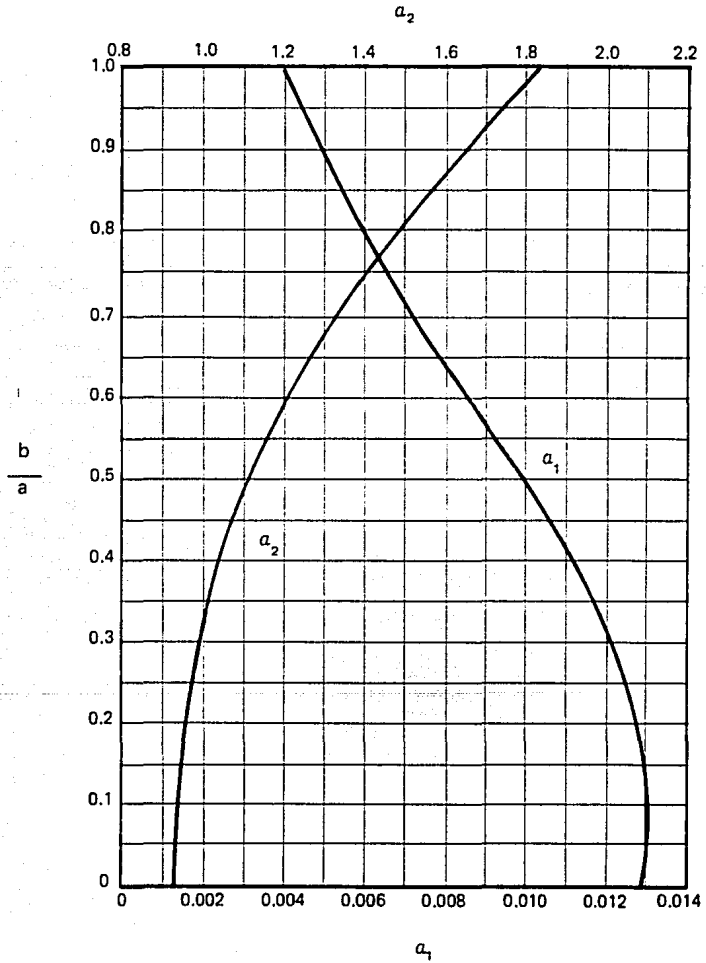
Es necesario comprobar además que en los apoyos no se excede la capacidad del núcleo al apiastamiento y que no se presentan fenómenos de ondulamiento ó formación de hoyuelos ó ampollas.

Otros tipos de carga se pueden convertir en " carga uniforme equivalente "

**VALORES DE  $\beta$  Y  $\gamma$  RESPECTO A LA RELACION a : b**

$\frac{a}{b}$	$\beta_b$	$\beta_a$	$\gamma$
1.0	0.0479	0.0479	0.420
1.2	0.0626	0.0501	0.455
1.4	0.0753	0.0506	0.478
1.6	0.0862	0.0493	0.491
1.8	0.0948	0.0479	0.499
2.0	0.1017	0.0464	0.503
3.0	0.1189	0.0404	0.505
4.0	0.1235	0.0384	0.502
5.0	0.1246	0.0375	0.501
$\infty$	0.1250	0.0375	0.500

VALORES DE  $a_1$  y  $a_2$  RESPECTO A LA RELACION ANCHO/LARGO

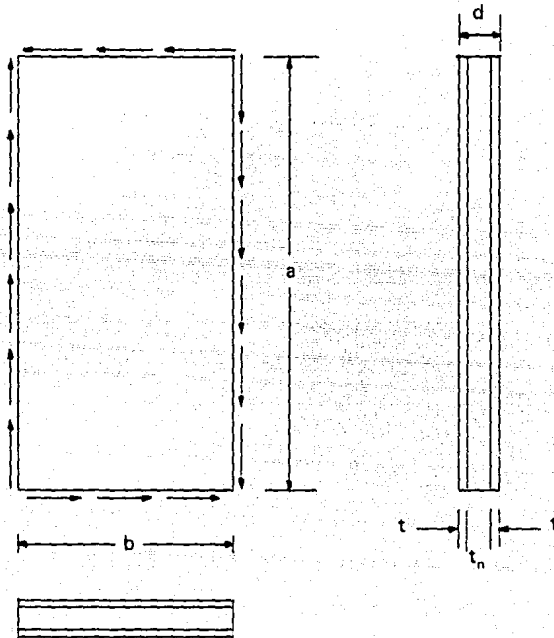


$a$  = largo del panel

$b$  = ancho

## FORMULAS PARA REVISION DE UN PANEL SOMETIDO A FUERZA CORTANTE

La carga se aplica como indica la figura



### ESFUERZO CRITICO EN LAS CUBIERTAS

$$f = \frac{K \pi^2 E_c t_n d}{4 \lambda_c b^2}$$

$$K = 5.35 + 4 \left( \frac{b}{a} \right)^2$$

## CLARO CRÍTICO DE UN PANEL SIMPLEMENTE APOYADO CON CARGA UNIFORME.

El claro se denomina crítico cuando se producen simultáneamente la falla del núcleo por esfuerzo cortante y el esfuerzo de fluencia en las cubiertas.

En claros menores que el crítico rige el esfuerzo cortante en el núcleo.

En claros mayores que el crítico rige el esfuerzo de tensión o compresión en las cubiertas generado por la flexión del panel.

$$f_c = \frac{M}{bth} \quad (1)$$

Para un panel simplemente apoyado con carga uniforme

$$M = \frac{pa^2}{8} \quad (2)$$

Sustituyendo (2) en (1):

$$f_c = \frac{pa^2}{8bth}$$

$$h = \frac{pa^2}{8btf_c} \quad (3)$$

$$v_n = \frac{V}{bh} \quad (4)$$

Para un panel simplemente apoyado con carga uniforme

$$V = \frac{pa}{2} \quad (5)$$

Sustituyendo (5) en (4):

$$v_n = \frac{pa}{2bh}$$

$$h = \frac{pa}{2bv_n} \quad (6)$$

Igualando los segundos miembros de (3) y (6)

$$\frac{pa^2}{8btf_c} = \frac{pa}{2bv_n}$$

$$a = \frac{4tf_c}{v_n}$$

$$a_{cr} = \frac{4 t f_{cu}}{V_{nu}}$$

$a_{cr}$  = claro crítico

$f_{cu}$  = esfuerzo de fluencia en las cubiertas

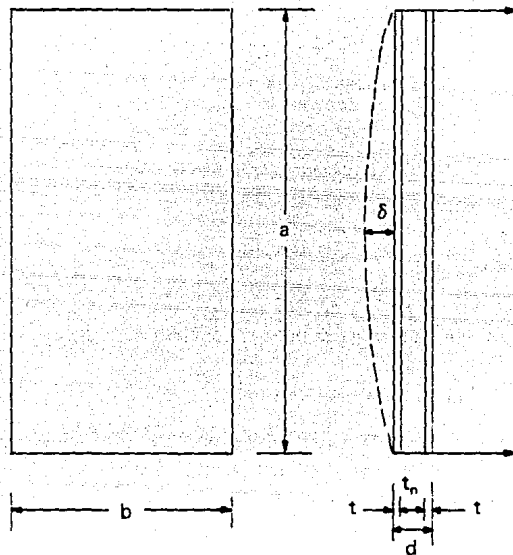
$V_{nu}$  = esfuerzo cortante último en el núcleo

Otros tipos de carga se pueden convertir en " carga uniforme equivalente "

Sí un panel se diseña por claro crítico, es necesario comprobar que en los apoyos no se excede la capacidad del núcleo al aplastamiento, que no se presentan fenómenos de ondulamiento ó formación de hoyuelos ó ampollas y que la flecha es aceptable.



**FUNCIONAMIENTO DE UN PANEL ESTRUCTURAL CON NUCLEO CELULAR, CUANDO SUS CUBIERTAS ADQUIEREN TEMPERATURAS DIFERENTES.**



El panel se alabea formando una superficie convexa hacia la cara con mayor temperatura.

Parte de la dilatación diferencial entre las dos cubiertas, deforma al núcleo sin inducir alabeo en el panel.

Para un panel sujeto en dos de sus bordes paralelos:

**FLECHA**

$$\delta = \frac{a^2 \Delta}{8 h}$$

## **NOTA:**

**Los criterios de diseño precedentes corresponden a paneles con cubiertas delgadas isotrópicas, pero son aceptables para paneles con cubiertas ortotrópicas.**

**El análisis riguroso está orientado principalmente hacia el diseño de aeronaves y cosmonaves, es sumamente complejo y requiere del apoyo de numerosas pruebas de laboratorio.**

## **NOMOGRAMA PARA EL DISEÑO DE PANELES CON NUCLEO CELULAR**

El nomograma es un método de cálculo rápido desarrollado, para diseñar paneles libremente apoyados, con carga concentrada en el centro del claro ó con carga uniforme.

El nomograma proporciona:

- Espesor de las cubiertas
- Espesor del panel
- Momento de inercia del panel
- Peso por unidad de área del panel
- Flecha por flexión
- Flecha por cortante

Para simplificar el diseño se considera que las cubiertas toman todo el momento flexionante, despreciando la contribución del núcleo y que el núcleo toma toda la fuerza cortante, despreciando la contribución de las cubiertas.

El diseño se hace al límite, considerando como esfuerzo último del material de las cubiertas el esfuerzo en el punto cedente ( esfuerzo de fluencia ).

Las ecuaciones graficadas son las correspondientes a paneles libremente apoyados con carga concentrada en el centro del claro ó con carga uniforme.

### 1.- MOMENTO DE INERCIA DEL PANEL

$$I = \frac{b d^3}{12} - \frac{b t_n^3}{12}$$

### 2.- MOMENTO FLEXIONANTE

$$M = \frac{P l}{4} \quad (\text{carga concentrada})$$

$$M = \frac{p l^2}{8} \quad (\text{carga uniforme})$$

### 3.- FLECHA POR FLEXION

$$\delta = \frac{1}{48} \frac{P l^3}{D} \quad (\text{carga concentrada})$$

$$\delta = \frac{5}{384} \frac{p l^4}{D} \quad (\text{carga uniforme})$$

#### 4.— FLECHA POR CORTANTE

$$\delta = \frac{1}{4} \frac{P l}{U} \quad (\text{carga concentrada})$$

$$\delta = \frac{1}{8} \frac{p l^2}{U} \quad (\text{carga uniforme})$$

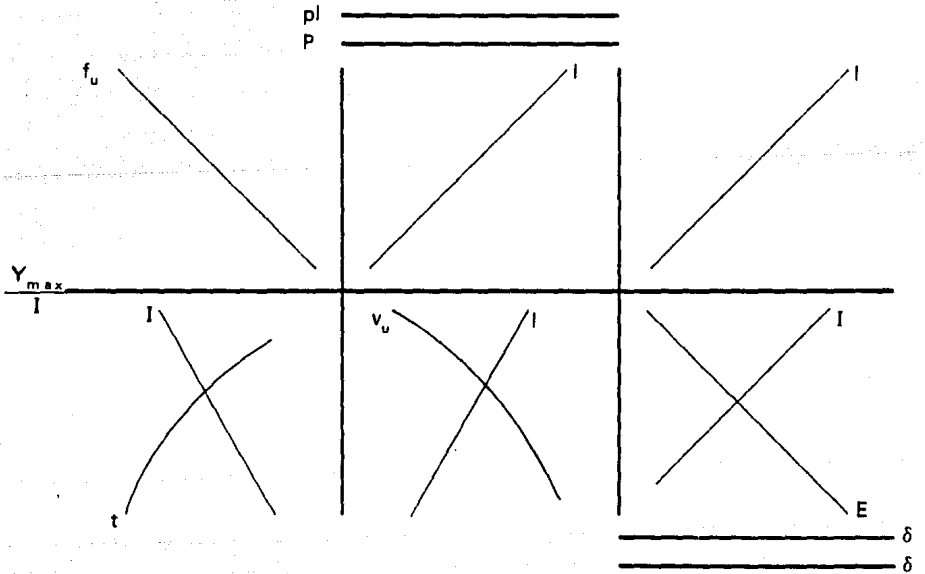
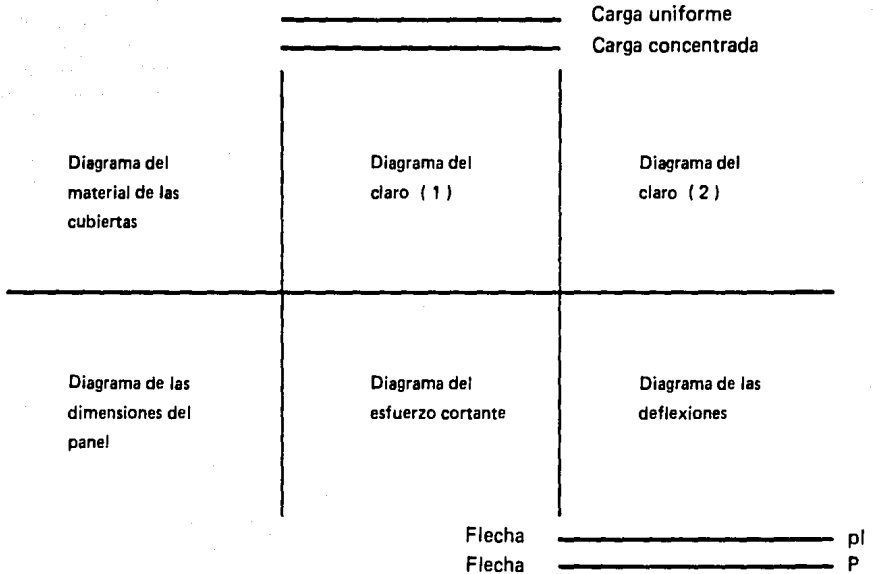
#### 5.— ESFUERZO EN LAS CUBIERTAS

$$f = \frac{M}{S}$$

El nomograma está hecho para vigas de 30 cm. de ancho. El primer paso para aplicarlo es transformar la carga de la viga en estudio a la equivalente en una viga de 30 cm. de ancho.

El diseño se hace al límite. La carga con la que se entra al nomograma es la carga de diseño multiplicada por el factor de seguridad.

# ESQUEMA DEL NOMOGRAMA



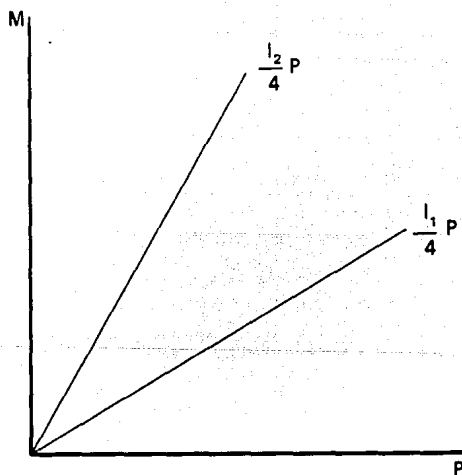
Cada diagrama está graficado con escala Log – Log, con lo cual resultan familias de rectas paralelas, que permiten utilizar el nomograma con igual grado de seguridad para cualquier valor.

Ejemplo:

$$M = \frac{P l}{4}$$

Graficado con escalas aritméticas:

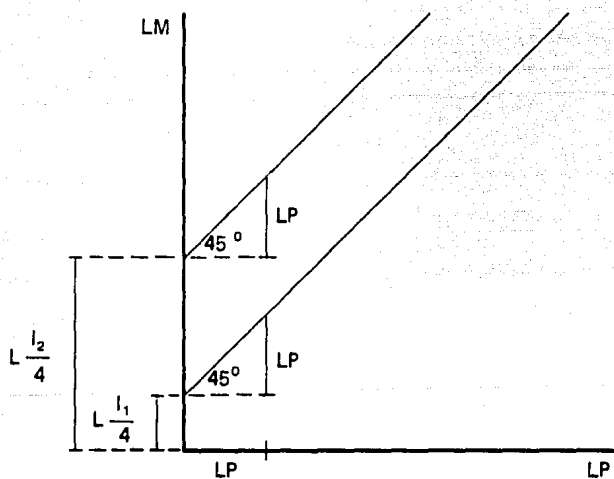
$$M = \frac{l}{4} P$$



Graficado en escalas Log – Log

$$LM = L \frac{PI}{4}$$

$$LM = L \frac{I}{4} + LP$$





CARGA TOTAL  
DISTRIBUIDA

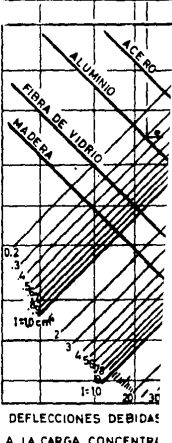
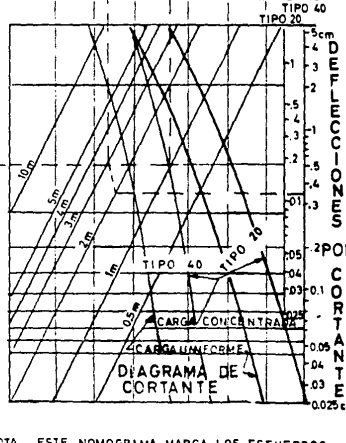
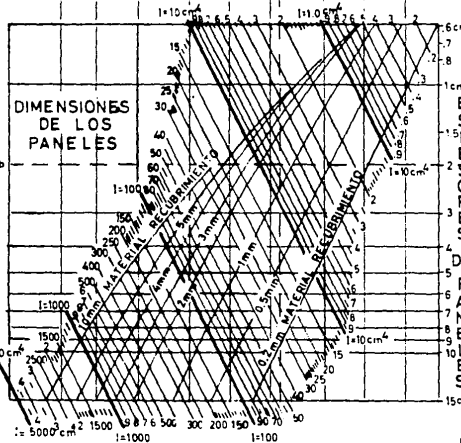
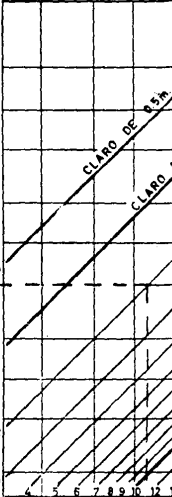
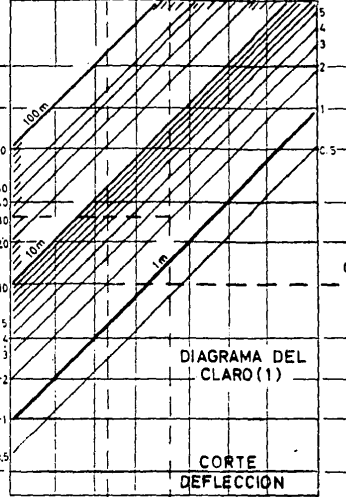
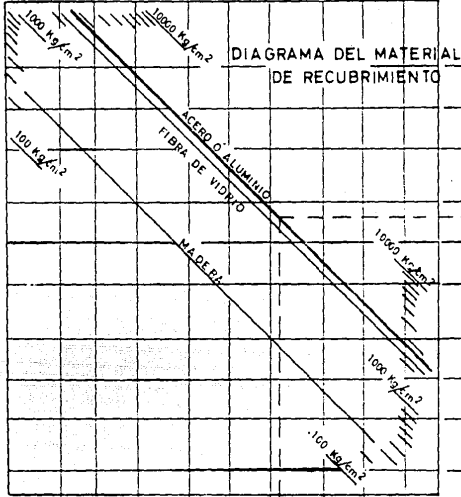
50 Kgs 100 200 300 500 1000 2000 5000 10000 Kgs

RRRRRRRR

CARGA CONCENTRADA

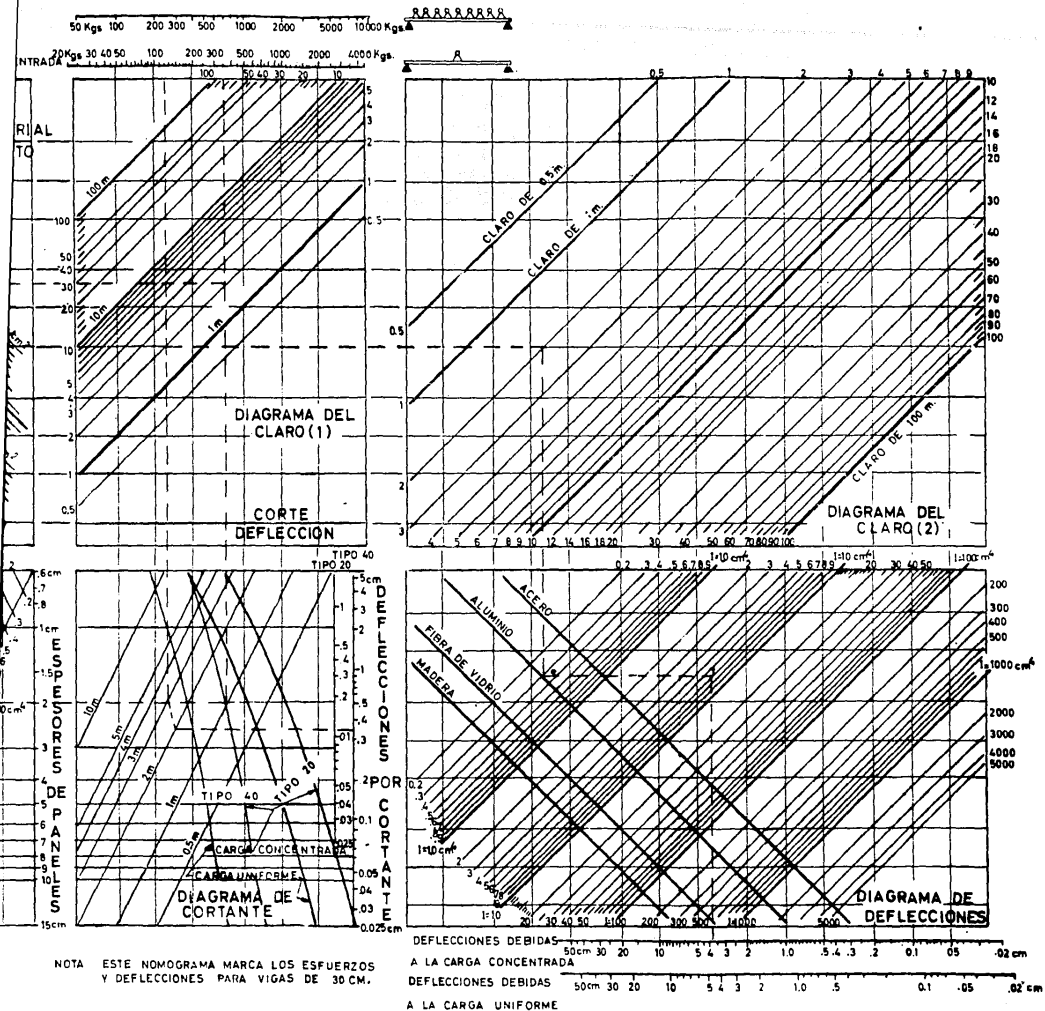
20 30 40 50 100 200 300 500 1000 2000 4000 Kgs

R



NOTA ESTE NOMOGRAMA MARCA LOS ESFUERZOS Y DEFLECCIONES PARA VIGAS DE 30 CM.

DEFLECCIONES DEBIDAS A LA CARGA CONCENTRADA  
DEFLECCIONES DEBIDAS A LA CARGA UNIFORME



NOTA ESTE NOMOGRAMA MARCA LOS ESFUERZOS Y DEFLECCIONES PARA VIGAS DE 30 CM.

DEFLECCIONES DEBIDAS A LA CARGA CONCENTRADA  
 DEFLECCIONES DEBIDAS A LA CARGA UNIFORME

## EJEMPLO DE DISEÑO UTILIZANDO EL NOMOGRAMA

Diseñar un tablón con cubiertas de aluminio y núcleo celular 60 - 20 - 40, de 2 m. de claro y 50 cm. de ancho, para una carga concentrada de 200 Kg. al centro del claro y con un factor de seguridad de 3.

Calcular la flecha bajo la carga

### 1.— CARGA DE DISEÑO

- a. Transformar la carga para 30 cm. de ancho

$$P = 200 \times \frac{30}{50} = 120 \text{ Kg.}$$

- b. El factor de seguridad es 3, así que se diseñará para una carga última de

$$120 \times 3 = 360 \text{ Kg.}$$

### 2.— DISEÑO POR CORTANTE

- a. Entrar al nomograma por la " Escala para carga concentrada " (en la parte superior central), con la carga última ( 360 Kg. )
- b. Bajar verticalmente al " Diagrama de Cortante " hasta intersectar la línea que corresponde al tipo de carga ( carga concentrada ) y al núcleo celular que se empleará ( 60 - 20 - 40 )

- c. Trazar una horizontal hacia la izquierda al " Diagrama de Dimensiones del Panel " ( línea a - b )

Cualquier punto de esta línea representa una combinación de espesor de las cubiertas y espesor del panel que falla al cortante con una carga de 360 Kg.

Cualquier punto abajo de la línea a - b representa una combinación de espesor de las cubiertas y espesor del panel más resistente.

### 3.— DISEÑO POR FLEXION

- a. Entrar al nomograma por la " Escala para carga concentrada " ( en la parte superior central ) con la carga última ( 360 Kg. )
- b. Bajar verticalmente al " Diagrama del claro " hasta intersectar la línea que corresponde al claro de la viga ( 2 m ).
- c. Trazar una horizontal hacia la izquierda al " Diagrama de Material de las cubiertas ", hasta intersectar la línea correspondiente al material de las cubiertas ( aluminio ).
- d. Trazar una vertical hacia el " Diagrama de dimensiones del panel " ( línea c - d ). Cualquier punto de esta línea representa una combinación de espesor de las cubiertas y espesor del panel que falla a la flexión con una carga de 360 Kg.

Cualquier punto a la izquierda de la línea c - d representa una combinación de espesor de las cubiertas y espesor del panel más resistente.

#### 4.— DISEÑO BALANCEADO

La viga balanceada, que falla simultáneamente por flexión y por cortante, con una carga de 360 Kg., es la determinada por la intersección de las líneas a - b y c - d.

Espesor de las cubiertas 1.4 mm.

Espesor del panel 2.0 cm.

$$I = 7 \text{ cm}^4$$

#### 5.— FLECHA POR FLEXION

- a. Entrar al nomograma por la " Escala para carga concentrada " ( en la parte superior central ) con la carga de diseño ( 120 Kg. )
- b. Bajar verticalmente al " Diagrama del claro ( 1 ) " hasta intersectar la línea correspondiente al claro ( 2 m ).

- c. Trazar una horizontal hacia la derecha al " Diagrama del claro ( 2 ) ", hasta intersectar la línea correspondiente al claro ( 2 m ).
- d. Bajar verticalmente hacia el " Diagrama de deflexiones ", hasta intersectar a la línea correspondiente al material de la cubierta ( aluminio ).
- e. Trazar una horizontal hasta intersectar la línea correspondiente al momento de inercia del panel (  $I = 7 \text{ cm}^4$  ).
- f. Bajar verticalmente hasta la escala " Deflexiones debidas a carga concentrada " ( en la parte inferior derecha ), obteniéndose 3.8 cm.

#### 6.— FLECHA POR CORTANTE

- a. Entrar al nomograma por la " Escala para carga concentrada " ( en la parte superior central ), con la carga de diseño ( 120 kg. ).
- b. Bajar verticalmente hacia el " Diagrama de cortante " hasta intersectar la línea a - b, determinada al diseñar por cortante.
- c. Trazar una paralela a la línea que corresponde al tipo de carga ( carga concentrada ) y al núcleo celular que se empleará ( 60 - 20 - 40 ) hasta intersectar la línea correspondiente al claro ( 2 m ).
- d. Trazar un horizontal hacia la derecha hasta la " Escala de deflexión por cortante ", correspondiente al tipo de núcleo celular que se empleará ( 60 - 20 - 40 ), obteniéndose 0.35 cm.

## 7.- FLECHA TOTAL

La flecha total es la suma de la flecha por flexión y la flecha por constante

$$\delta = 3.8 + 0.35 = 4.15 \text{ cm.}$$

## 8.- REDISEÑO CUANDO LA FLECHA OBTENIDA ES MAYOR QUE LA PERMISIBLE

Sea por ejemplo: flecha permisible 1% del claro

$$\text{Flecha permisible} = 0.01 \times 200 = 2 \text{ cm.}$$

$$\text{Flecha obtenida} = 4.15 \text{ cm.} > \text{flecha permisible} = 2 \text{ cm.}$$

a. Momento de inercia necesario para obtener la flecha permisible.

Se entra al nomograma por la escala " Deflexión debida a la carga concentrada " ( en la parte inferior derecha ), con la flecha permisible ( 2 cm. )

Se traza una vertical hacia el " Diagrama de deflexiones " hasta intersectar a la línea e - f.

La intersección determina el momento de inercia necesario (  $I = 14 \text{ cm}^4$  ).

- b. Espesor de las cubiertas y del panel para que la flecha sea la permisible.

Se utiliza el " Diagrama de dimensiones del panel ".

Cualquier punto de la línea  $I = 14 \text{ cm}^4$  define una combinación de espesor de las cubiertas y espesor del panel que satisfaca la condición de flecha permisible.

El punto que define el diseño del panel debe estar también abajo de la línea a - b y a la izquierda de la línea c - d, para satisfacer las condiciones de resistencia a la flexión y al cortante.

Una combinación posible es: espesor de las cubiertas 2 mm.  
espesor del panel 2.3 cm.

#### 9.- RESISTENCIA A LA FLEXION DEL PANEL REDISEÑADO PARA CUMPLIR LA CONDICION DE FLECHA PERMISIBLE

- a. Desde el punto del " Diagrama de dimensiones del panel " correspondiente a espesor de las cubiertas 2 mm. y espesor del panel 2.3 cm., trazar una vertical hacia el " Diagrama de material de las cubiertas " hasta intersectar a la línea correspondiente al material de las cubiertas ( aluminio ).
- b. Trazar una horizontal hacia el " Diagrama del claro ( 1 ) " hasta intersectar la línea correspondiente al claro de 2 m.



- c. Trazar una vertical hacia la " Escala de carga concentrada ", encontrando que la carga última por flexión es de 600 Kg.

**10.- RESISTENCIA AL CORTANTE DEL PANEL REDISEÑADO PARA CUMPLIR LA CONDICION DE FLECHA PERMISIBLE**

- a. Desde el punto del " Diagrama de dimensiones del panel " correspondiente a espesor de las cubiertas 2 mm. y espesor del panel 2.3 cm., trazar una horizontal hacia el " Diagrama de cortante " hasta intersectar a la línea que corresponde al tipo de carga ( carga concentrada ) y al núcleo celular que se empleará ( 60 - 20 - 40 ).
- b. Trazar una vertical hacia la " Escala de carga concentrada", encontrando que la carga última por cortante es de 400 Kg.

**11.- FACTOR DE SEGURIDAD DEL PANEL REDISEÑADO**

Rige la carga por cortante = 400 Kg.

$$\text{Factor de seguridad} = \frac{400}{120} = 3.3$$

## NOMOGRAMA PARA CALCULAR EL PESO UNITARIO DE UN PANEL

### 1.- PESO DEL NUCLEO

- a.  $\text{Espesor del núcleo} = 2.0 - (2 \times 0.14) = 1.72 \text{ cm.}$
- b. En la gráfica **Espesor del núcleo / peso del núcleo**, entrar con el espesor del núcleo ( 1.72 cm ), y trazar una horizontal hasta intersectar la línea correspondiente al tipo de núcleo ( 60 - 20 - 40 )
- c. Subir verticalmente hasta la escala " **Peso del núcleo** ", obteniéndose  $1 \text{ Kg / m}^2$

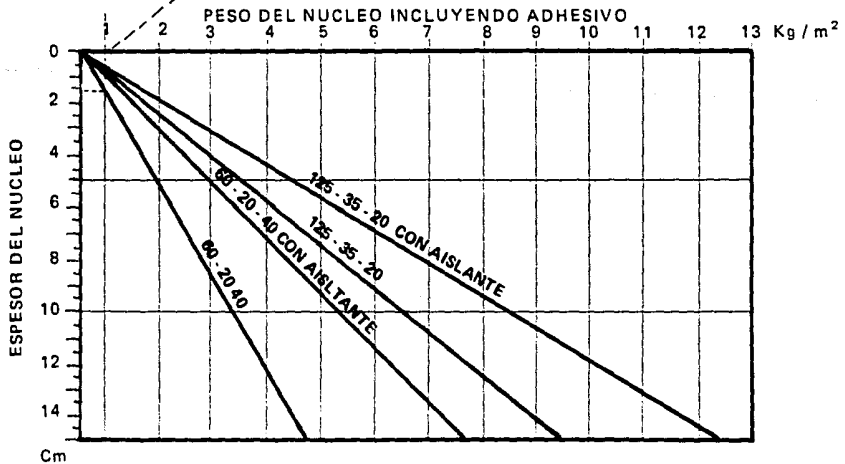
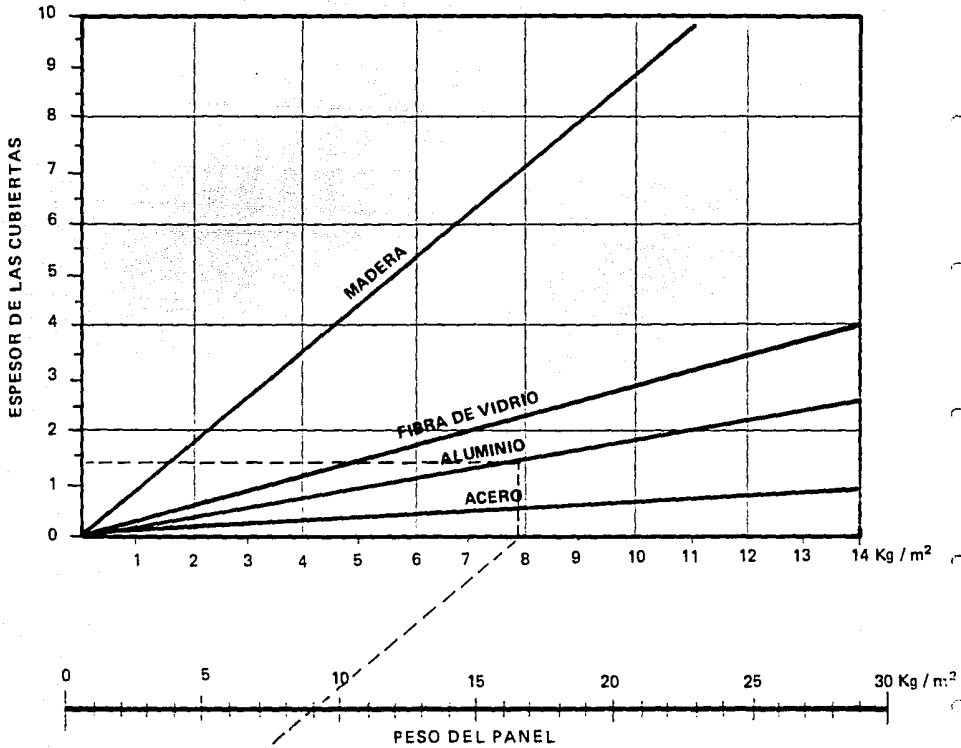
### 2.- PESO DE LAS CUBIERTAS

- a. En la gráfica " **Espesor de las cubiertas / peso de las cubiertas** ", entrar con el espesor de cada cubierta ( 1.4 mm ) y trazar una horizontal hasta intersectar la línea correspondiente al material de las cubiertas ( aluminio ).
- b. Bajar verticalmente hasta la escala " **Peso de las cubiertas** ", obteniéndose  $7.9 \text{ Kg / m}^2$ .

### 3.- PESO DEL PANEL

- a. Conectar con una recta el peso del núcleo / m<sup>2</sup> con el peso de las cubiertas / m<sup>2</sup>.
- b. Leer en la intersección con la escala " Peso del Panel ", obteniéndose 8.9 Kg / m<sup>2</sup>.

# NOMOGRAMA PARA CALCULAR EL PESO UNITARIO DE UN PANEL



## DISEÑO DE UN PANEL ESTRUCTURAL CON LA MAXIMA RELACION RIGIDEZ A LA FLEXION / PESO.

La rigidez a la flexión de un panel con cubiertas suficientes delgadas para poder despreciar la rigidez a la flexión de las cubiertas respecto a su propio eje es:

$$\bar{D} = E_c \frac{t h^2}{2 \lambda_c} \quad (1)$$

El peso por unidad de área del panel es:

$$w = 2 \rho_c t + \rho_n t_n + \text{peso del adhesivo}$$

El peso del adhesivo se desprecia

$$w = 2 \rho_c t + \rho_n t_n \quad (2)$$

Despejando  $t$  de (1) y sustituyendo en (2)

$$w = \frac{4 \bar{D} \lambda_c \rho_c}{E_c h^2} + \rho_n t_n \quad (3)$$

Para paneles con cubiertas delgadas:

$$t_n \approx h \quad (4)$$

Sustituyendo (4) en (3):

$$w = \frac{4 \bar{D} \lambda_c \rho_c}{E_c h^2} + \rho_n h \quad (5)$$

El valor para el que  $w$  es mínimo se obtiene derivando (5) respecto a  $h$  e igualando a cero.

$$\frac{dw}{dh} = - \frac{8 \bar{D} \lambda_c \rho_c}{E_c h^3} + \rho_n = 0$$

$$h = \sqrt[3]{\frac{8 \bar{D} \lambda_c \rho_c}{E_c \rho_n}} \quad (6)$$

RELACION ENTRE EL PESO DEL NUCLEO Y EL PESO TOTAL DE UN PANEL CON LA MAXIMA RELACION RIGIDEZ A LA FLEXION / PESO

De (5) se obtiene:

$$\frac{w}{h} = \frac{4 \bar{D} \lambda_c \rho_c}{E_c h^3} + \rho_n \quad (7)$$

Sustituyendo (6) en el segundo miembro de (7)

$$\frac{w}{h} = \frac{4 \bar{D} \lambda_c \rho_c}{E_c} \cdot \frac{E_c \rho_n}{8 \bar{D} \lambda_c \rho_c} + \rho_n$$

$$\frac{w}{h} = \frac{3}{2} \rho_n$$

$$w = \frac{3}{2} \rho_n h$$

$$\rho_n h = \frac{2}{3} w$$

$\rho_n h$  = peso por unidad de área del núcleo.

El valor máximo de la relación rigidez a la flexión / peso de un panel se obtiene cuando el peso del núcleo es  $\frac{2}{3}$  del peso total.

**RELACION ENTRE EL ESPESOR DE LAS CUBIERTAS Y LA DISTANCIA ENTRE LOS CENTROIDES DE LAS CUBIERTAS EN UN PANEL CON LA MAXIMA RELACION RIGIDEZ A LA FLEXION / PESO**

De (6) se obtiene:

$$h^3 = \frac{8 \bar{D} \lambda_c \rho_c}{E_c \rho_n}$$

$$\bar{D} = \frac{h^3 E_c \rho_n}{8 \lambda_c \rho_c} \quad (8)$$

Igualando los segundos miembros de (1) y (8)

$$E_c \frac{th^2}{2 \lambda_c} = \frac{h^3 E_c \rho_n}{8 \lambda_c \rho_c}$$

$$\frac{t}{h} = \frac{1}{4} \frac{\rho_n}{\rho_c}$$

El valor máximo de la relación rigidez a la flexión / peso de un panel se obtiene cuando la relación entre el espesor de las cubiertas y la distancia entre los centroides de las cubiertas es igual a:

$$\frac{1}{4} \frac{\rho_n}{\rho_c}$$



## **RESISTENCIA DE UN PANEL AL IMPACTO**

La resistencia al impacto de un panel depende principalmente de la rigidez de las cubiertas y en menor grado del espesor del núcleo.

A medida que las cubiertas son más rígidas la fuerza del impacto se distribuye sobre mayor área del núcleo.

Una rotura por impacto localizada en una área reducida no afecta sensiblemente la resistencia del panel.

La resistencia al impacto es uno de los principales factores que se deben analizar al elegir las cubiertas de un panel.

## **RESISTENCIA DE UN PANEL A LA FATIGA**

**FATIGA** es el fenómeno de orientación de las moléculas ( cristalización ) en algunos materiales, producida por carga pulsante.

La carga pulsante puede tener origen mecánico ó sónico.

El panel es un elemento constructivo poco propicio a la fatiga, sus características constructivas ( unión de las cubiertas con el núcleo en toda su área ) evitan los puntos de concentración de esfuerzos en los que se inicia la falla por fatiga.

Los paneles sujetos a carga pulsante sónica deben estar libres de defectos locales ( tales como zonas no adheridas ), que se pueden propagar por la vibración de las cubiertas.

## DISEÑO TERMICO

### TRANSMISION DEL CALOR

El calor se transmite por:

1. Conducción
2. Convección
3. Radiación

#### 1. CONDUCCION

La energía térmica se transmite de las moléculas con mayor temperatura a sus vecinas con menor temperatura.

La cantidad de calor transmitida en la unidad de tiempo por conducción, en un cuerpo homogéneo es:

$$Q = K \frac{A}{d} (T_1 - T_2)$$

$T_1 - T_2 =$  gradiente de temperatura

## 2. CONVECCION

Este mecanismo de transmisión del calor es factible únicamente cuando el medio es un fluido.

La energía térmica se transmite por la translación de las moléculas del fluido a mayor temperatura hacia zonas a menor temperatura en donde ceden su calor por conducción.

Si la translación de las moléculas del fluido es causada por diferencia de densidad, la convección se denomina natural.

Si la translación de las moléculas del fluido es causada por una bomba ó ventilador, la convección se denomina forzada.

La cantidad de calor transmitida en la unidad de tiempo por convección es:

$$Q = H A (T_1 - T_2)$$

Para aire a la presión atmosférica confinado en un tubo

$$H = 10^{-4} \left( \frac{T_1 - T_2}{s} \right)^{\frac{1}{4}}$$

### 3. RADIACION

La energía térmica se transmite como energía radiante que emana de la superficie de todo cuerpo caliente.

La energía térmica radiante se transmite en el vacío y a través de cuerpos no opacos.

Cuando la energía térmica radiante incide en un cuerpo opaco, es absorbida y se transforma en calor.

La energía térmica radiante que emite una superficie por unidad de tiempo es:

$$R = \sigma e A T^4$$

$$\sigma = 5.6699 \times 10^{-5} \text{ en el sistema cgs}$$

$$\sigma = 5.6699 \times 10^{-8} \text{ en el sistema MKS}$$

La emisividad y receptividad de una superficie dependen de su color y pulimento y varían ligeramente con la temperatura.

El poder emisivo de una superficie se expresa en una escala cuyos extremos son 0 y 1.

Todo cuerpo emite y recibe energía térmica radiante.

En un sistema formado por dos láminas iguales paralelas, a distinta temperatura, la energía térmica radiante neta que pasa de la lámina a mayor temperatura a la lámina a menor temperatura es:

$$Q = \sigma e A (T_1^4 - T_2^4)$$

La transmisión de calor por radiación se reduce colocando barreras reflejantes normales a la dirección del flujo térmico.

$$Q_m = \frac{Q_0}{m + 1}$$

$Q_m$  = cantidad de calor transmitida en la unidad de tiempo por radiación entre dos planos paralelos con  $m$  barreras reflejantes normales al flujo de calor intercaladas.

$Q_0$  = cantidad de calor transmitida en la unidad de tiempo por radiación entre dos planos paralelos sin barreras.

$m$  = número de barreras

## **DETERMINACION EXPERIMENTAL DE LA CONDUCTIVIDAD TERMICA DE UN MATERIAL.**

Procedimiento ASTM C - 177

El aparato que se emplea consiste en:

Un plato caliente central, con resistencias eléctricas en espiral, divididas en un grupo central y un grupo de borde.

Dos platos fríos exteriores.

Potenciómetros para medir la potencia eléctrica que se aplica a las resistencias.

Termopares para medir la temperatura en las superficies de contacto de los especímenes con los platos.

Entre el plato caliente y cada uno de los platos fríos se colocan especímenes iguales y material aislante rodeando a cada especimen.

Las resistencias de borde tienen por objeto compensar las pérdidas de calor por los bordes del especimen y en consecuencia la potencia eléctrica que se les aplica no se considera en los cálculos.

La potencia eléctrica aplicada y las temperaturas se miden después de que se alcanzan condiciones estables.

La conductividad térmica se calcula aplicando la ecuación:

$$K = \frac{Q d}{A (T_1 - T_2)}$$

$Q$  = Se mide por la potencia eléctrica aplicada expresada en Kcal / hora.

$T_1$  = Se mide en la superficie del espécimen en contacto con el plato caliente.

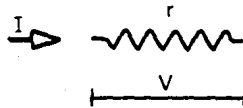
$T_2$  = Se mide en la superficie del espécimen en contacto con el plato frío.



## RESISTENCIA DE UN MATERIAL SOLIDO HOMOGENEO AL PASO DE LA ENERGIA CALORIFICA.

### SIMIL ELECTRICO

El paso de la energía calorífica a través de un material es similar al paso de la energía eléctrica a través de una resistencia.



La energía calorífica que fluye en la unidad de tiempo es equivalente a la intensidad de la energía eléctrica.

$$Q = I$$

La diferencia de temperaturas es equivalente a la diferencia de potencial.

$$T_1 - T_2 = V$$

La conductividad térmica es equivalente a la conductividad eléctrica.

$$K = \frac{1}{\rho}$$

$$\rho = \frac{1}{K} \quad (1)$$

La resistencia al paso de la energía calorífica es equivalente a la resistencia al paso de la energía eléctrica.

$$r = \rho \frac{d}{A} \quad (2)$$

Sustituyendo (1) en (2)

$$r = \frac{1}{K} \frac{d}{A}$$

$$K = \frac{1}{r} \cdot \frac{d}{A}$$

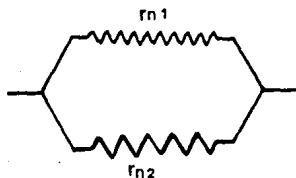
## CONDUCTIVIDAD TERMICA DE UN NUCLEO CELULAR

La conductividad térmica de un núcleo celular depende de:

1. La geometría de las celdillas
2. El material de las paredes de las celdillas
3. El material que ocupa las celdillas
4. La temperatura media

Conociendo la conductividad térmica del material de las paredes de las celdillas y del aire ó material aislante que ocupa las celdillas, se puede determinar la conductividad térmica del núcleo celular mediante una analogía eléctrica.

La transmisión de calor por conducción se realiza en paralelo a través de las paredes de las celdillas y a través del aire ó material aislante que ocupa las celdillas



$$\frac{1}{r_n} = \frac{1}{r_{n1}} + \frac{1}{r_{n2}}$$

$$\frac{1}{r_n} = \frac{K_n A_n}{t_n}$$

$$\frac{1}{r_{n1}} = \frac{K_{n1} A_{n1}}{t_n}$$

$$\frac{1}{r_{n2}} = \frac{K_{n2} A_{n2}}{t_n}$$

$$\frac{K_n A_n}{t_n} = \frac{K_{n1} A_{n1}}{t_n} + \frac{K_{n2} A_{n2}}{t_n}$$

$$K_n A_n = K_{n1} A_{n1} + K_{n2} A_{n2}$$

$$K_n = K_{n1} \frac{A_{n1}}{A_n} + K_{n2} \frac{A_{n2}}{A_n}$$

$$A_{n2} = A_n - A_{n1}$$

**Los valores de la conductividad térmica de un núcleo celular obtenidos experimentalmente son ligeramente superiores a los obtenidos aplicando las fórmulas, debido a que en el cálculo teórico se desprecia la transmisión de calor por convección.**

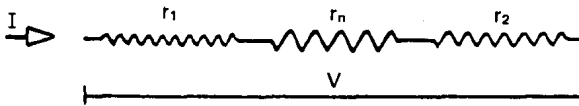
**Cuanto menor es el espesor del núcleo, mayor es el predominio de la conducción sobre la convección y la radiación.**

## CONDUCTIVIDAD TERMICA DE UN PANEL

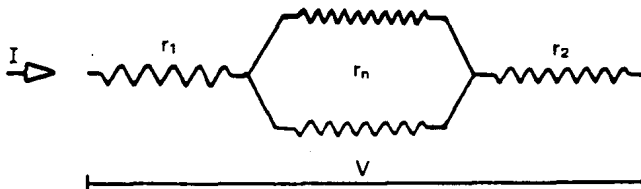
Conociendo la conductividad térmica de cada una de las cubiertas y del núcleo, se puede determinar la conductividad térmica del núcleo celular mediante una analogía eléctrica.

La transmisión de calor por conducción se realiza en serie a través de la cubierta 1, el núcleo y la cubierta 2.

Para un panel con núcleo homogéneo:



Para un panel con núcleo celular:



$$r = r_1 + r_n + r_2$$

$$r_1 = \frac{1}{K_1} \cdot \frac{t_1}{A}$$

$$r_n = \frac{1}{K_n} \cdot \frac{t_n}{A}$$

$$r_2 = \frac{1}{K_2} \cdot \frac{t_2}{A}$$

Finalmente, el valor de la conductividad térmica del panel se calcula llevando el valor de  $r$  a la expresión:

$$K = \frac{1}{r} \cdot \frac{d}{A}$$

## TRANSMISION DEL CALOR A TRAVES DE UN PANEL CON NUCLEO CELULAR CON AIRE EN LAS CELDILLAS.

1. **POR CONDUCCION:** en parte a través de las paredes de las celdillas y en parte a través del aire.

$$Q = K \frac{A}{d} (T_1 - T_2)$$

2. **POR CONVECCION:** la diferencia de temperatura entre las cubiertas origina en el aire confinado en cada celdilla un gradiente de temperatura y en consecuencia un gradiente de densidad que le hace circular.

El aire a mayor temperatura que entra en contacto con la cubierta a menor temperatura, le cede su calor por conducción.

La limitada movilidad del aire dentro de las celdillas hace que la transmisión de calor por conducción sea despreciable.

$$Q = H (A_n - A_{n1}) (T_1 - T_2)$$

3. **POR RADIACION:** el aire que llena las celdillas permite el paso de la energía térmica radiante.

$$Q = \sigma e (A_n - A_{n1}) (T_1^4 - T_2^4) f$$

Los paneles con núcleo celular con aire en las celdillas son poco eficientes para aislamiento térmico a altas temperaturas debido a una intensa transferencia de calor por radiación.



## **TRANSMISION DEL CALOR A TRAVES DE UN PANEL CON NUCLEO CELULAR, CON ESPUMA PLASTICA O MATERIAL GRANULAR EN LAS CELDILLAS.**

Las celdillas se llenan con espuma plástica ligera fenólica ó de poliuretano, microesferas de poliestireno expandido ó arena de carlita expandida, con conductividad térmica menor que la del aire.

1. **POR CONDUCCION:** el flujo de calor a través de las celdillas es menor si están ocupadas por espuma plástica ó material granular que si estuviesen llenas de aire.

$$Q = K \frac{A}{d} (T_1 - T_2)$$

2. **POR CONVECCION:** se elimina, porque la espuma plástica ó el material granular no permiten el movimiento del aire confinado en cada celdilla.

$$Q = 0$$

3. **POR RADIACION:** se elimina, porque el material contenido en las celdillas no permite el paso de la energía térmica radiante.

$$Q = 0$$

## TRANSMISION DE CALOR A TRAVES DE UN PANEL CON NUCLEO DE ESPUMA RIGIDA

El calor se transmite únicamente por conducción

$$Q = K \frac{A}{d} (T_1 - T_2)$$

$$K \frac{A}{d} = \frac{1}{r}$$

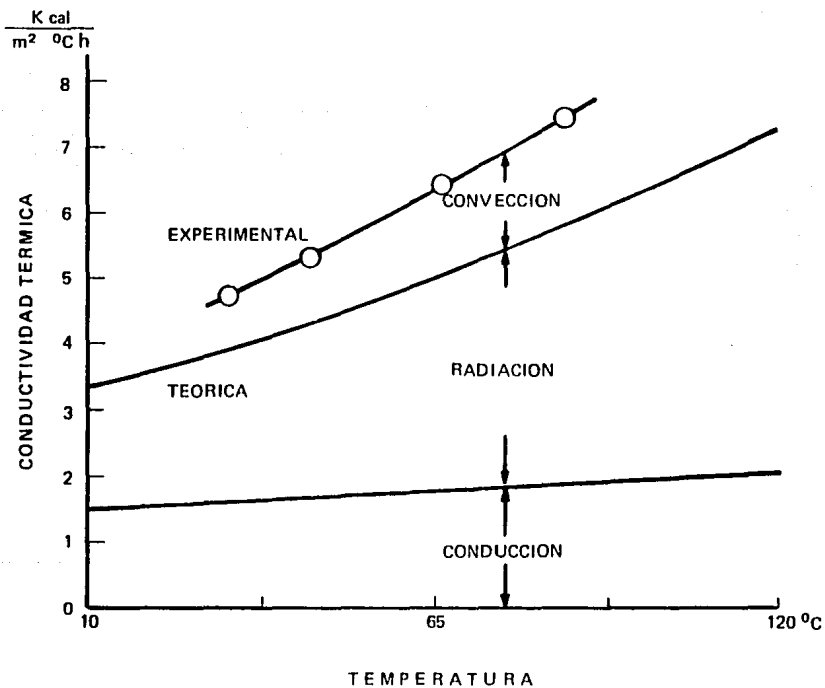
$$Q = \frac{1}{r} (T_1 - T_2)$$

La transmisión de calor por conducción se realiza en serie a través de la cubierta 1, el núcleo y la cubierta 2.

$$r = r_1 + r_n + r_2$$

# TRANSMISION DE CALOR POR CONDUCCION, RADIACION Y CONVECCION A TRAVES DE UN PANEL CON NUCLEO CELULAR

d = 5 cm.



**CONDUCTIVIDAD TERMICA DE PANELES CON NUCLEO CELULAR  
Y CUBIERTAS DE ALUMINIO**

ESPESOR DEL PANEL Cm	CONDUCTIVIDAD TERMICA	
	$\frac{K \text{ Cal}}{M^2 \text{ } ^\circ C h}$	
	Sin relleno aislante	Con relleno aislante
1.2	1.84	1.54
2.5	1.42	1.03
3.8	1.25	0.76
5.0	1.08	0.59
6.3	0.96	0.49
7.5	0.86	0.42
8.8	0.78	0.38
10.0	0.71	0.34
11.2	0.64	0.32
12.5	0.59	0.29
13.3	0.54	0.27
15.0	0.49	0.25

Determinados según ASTM C236

**CONDUCTIVIDAD TERMICA DE ALGUNOS MATERIALES  
PARA CUBIERTAS**

Espesor = 1 cm.

MATERIAL	COND. TERMICA $\frac{K \text{ cal}}{m^2 \text{ } ^\circ C \text{ h}}$
Aluminio	11 948.1
Acero	1 493.5
Madera contrachapada de:	
Abedul	15.6
Pino	11.9
Abeto	9.7
Placas de fibra de madera aglutinada	13.7

## CONDUCTIVIDAD TERMICA DE ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS

ELEMENTO	Espesor cm	Conductividad Térmica $\frac{K \text{ cal}}{m^2 \text{ } ^\circ C \text{ h}}$
Panel con cubiertas de aluminio 0.032 y núcleo celular sin relleno aislante	5	1.08
Panel con cubiertas de aluminio 0.032 y núcleo celular con relleno aislante	5	0.59
Tabique sin aplanado	20	2.45
	30	1.76
Concreto	30	2.79
Ventana con vidrio sencillo		5.54
Ventana con vidrio doble		2.21
Puerta de madera macisa	4	2.25

Método ASTM C-236

## DISEÑO ACUSTICO

### COEFICIENTE DE TRANSMISION

El coeficiente de transmisión indica la capacidad de un cuerpo para transmitir el sonido a través de su masa.

$K_t$  = Coeficiente de transmisión

$$K_t = \frac{\text{energía sónica que emerge}}{\text{energía sónica que incide}}$$

$$0 < K_t < 1$$

Los valores 0 y 1 nunca se obtienen en la práctica.

El valor 0 correspondería a un material que impidiese totalmente el paso del sonido (energía sónica que emerge = 0)

El valor 1 correspondería a un material que permitiese el paso del sonido sin atenuarlo.

(energía sónica que emerge = energía sónica que incide)

En los materiales para construcción de viviendas, oficinas y fábricas es deseable un bajo coeficiente de transmisión (valores próximos a cero), con objeto de evitar la entrada de sonidos generados en el exterior.

### FRECUENCIAS NATURALES DE VIBRACION DE UN CUERPO

Se presentan cuando la longitud del cuerpo es igual a un número entero de semilongitudes de onda (los extremos coinciden con nodos).

$$\text{Si } l = \frac{\lambda_1}{2} \Rightarrow \lambda_1 = \frac{2l}{1}$$

$$l = 2 \frac{\lambda_2}{2} \Rightarrow \lambda_2 = \frac{2l}{2}$$

$$l = 3 \frac{\lambda_3}{2} \Rightarrow \lambda_3 = \frac{2l}{3}$$

y así sucesivamente.

Puesto que:

$$f = \frac{u}{\lambda}$$



Las frecuencias naturales de vibración que corresponden a las longitudes de onda  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots$  son:

$$f_1 = \frac{u}{\lambda_1} = 1 \frac{u}{2l}$$

$$f_2 = \frac{u}{\lambda_2} = 2 \frac{u}{2l}$$

$$f_3 = \frac{u}{\lambda_3} = 3 \frac{u}{2l}$$

....

## FRECUENCIA FUNDAMENTAL Y ARMONICOS

Frecuencia fundamental es la frecuencia natural de vibración más baja.

$$f_1 = \frac{u}{2l}$$

Armónicos son las frecuencias naturales de vibración siguientes.

En general, la frecuencia fundamental de un panel es inferior al rango de frecuencia audible.

## **EFEECTO DE RESONANCIA**

Es el fenómeno que se produce cuando un cuerpo entra en vibración con una amplitud relativamente alta, debido a que ha recibido una serie de impulsos con frecuencia igual a una de sus frecuencias naturales de vibración.

## **EFEECTO DE COINCIDENCIA**

Para cada frecuencia arriba de cierta frecuencia crítica, existe un ángulo tal que si el sonido choca con el panel en esa dirección se transmite casi íntegramente, debido a que la longitud de onda del sonido en el aire coincide exactamente con la longitud de la onda flexionante del panel y así no hay discontinuidad entre las ondas en el aire a ambos lados del panel.

## **PROPIEDADES ACUSTICAS DE LOS PANELES**

La transmisión de energía sónica a través de un panel es controlada por la rigidez para frecuencias abajo de la frecuencia fundamental del panel y por la masa para frecuencia arriba de la frecuencia fundamental del panel.

Los paneles estructurales tienen alta rigidez / unidad de área y en consecuencia proporcionan buen aislamiento acústico para sonidos de baja frecuencia.

Para incrementar la masa / unidad de área de un panel con núcleo celular, se llenan sus celdillas con material granular de alto peso volumétrico ( escoria ó arena )

Para incrementar la resistencia interna a la vibración de un panel con núcleo celular, se llenan sus celdillas con espuma plástica.

Para que un panel no sea selectivo en cuanto a la frecuencia de los sonidos que detiene, debe tener balanceadas sus propiedades de rigidez, masa y resistencia interna a la vibración.

Entre los fenómenos de resonancia y coincidencia rige el control por masa de la transmisión del sonido.

#### CONTROL POR MASA.

Se ha observado que para obtener el control por masa de la transmisión del sonido a través de un panel, se requiere:

1.-  $d > 1.5 \text{ cm}$

2.-  $\frac{1}{m} < C^2$

$$C = \frac{2(1 + e/s) E_c t^3}{s^2}$$

Para asegurar que el panel ejerza control por masa en la transmisión del sonido para una amplia gama de frecuencias y lograr que el fenómeno de coincidencia ocurra únicamente con frecuencias muy altas, se establece para el diseño la condición.

$$\frac{\bar{U}}{\bar{m}} < \left( \frac{2}{3} C_s \right)^2$$

En un panel con núcleo celular y relleno de escoria ó arena, la pérdida de energía sónica por transmisión real es mayor que la teórica, debido a:

- 1.- El material granular de relleno disipa energía sónica transformándola en calor por la fricción que se genera al vibrar las partículas.
- 2.- El material granular de relleno apoya a las paredes de las celdillas y a las cubiertas incrementando la rigidez del panel.

Los paneles con núcleo celular y relleno de escoria ó arena tienen un bajo coeficiente de transmisión para todos los rangos de frecuencia.

Por tener masa / unidad de área relativamente baja, para que un panel sea efectivo para detener el sonido, debe estar firmemente sujeto.

**NOMOGRAMA PARA CALCULAR EL RELLENO GRANULAR NECESARIO PARA OBTENER CONTROL POR MASA EN LA TRANSMISION DE SONIDO EN UN PANEL Y LA PERDIDA DE ENERGIA SONICA POR TRANSMISION RESULTANTE.**

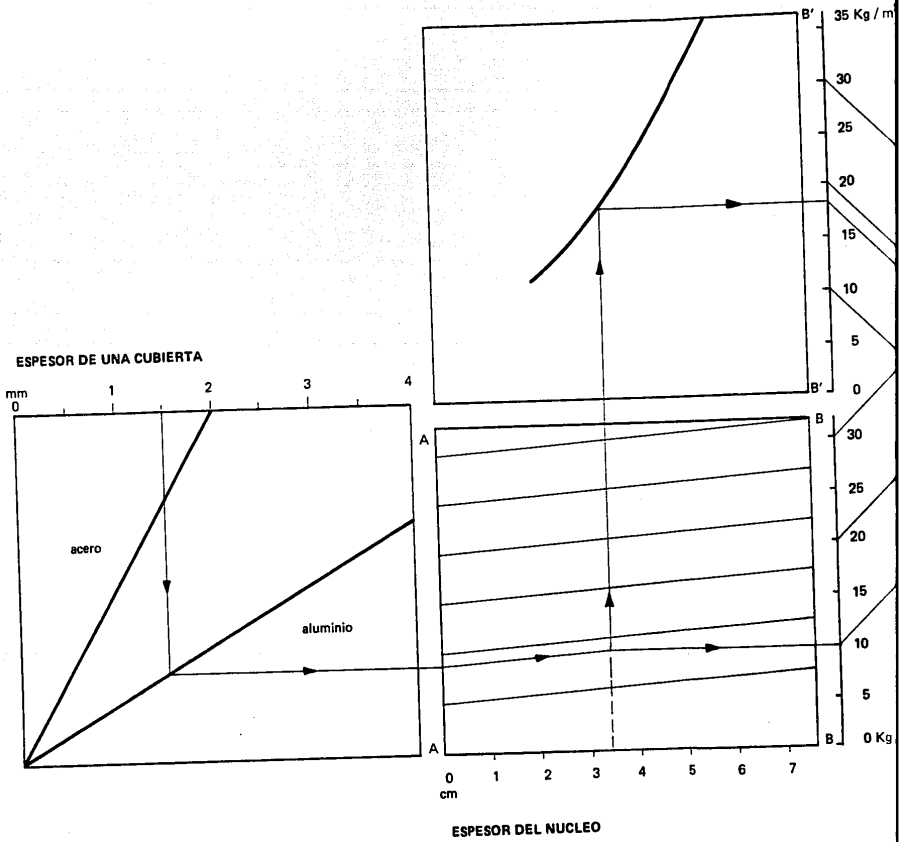
Sea un panel con núcleo celular de 3.5 cm. de espesor y cubiertas de aluminio de 1.5 mm. de espesor.

- 1.- Entrar por la escala " espesor de una cubierta " ( 1.5 mm. = 0.06 pulgadas ).
- 2.- Trazar una recta vertical hasta intersectar la línea correspondiente al material de las cubiertas ( aluminio ).
- 3.- Trazar una recta horizontal hacia la derecha hasta intersectar la escala A - A.
- 4.- Trazar hacia la derecha una recta paralela a las líneas inclinadas que parten de la escala A - A, hasta intersectar a la vertical levantada en el punto correspondiente a la escala " espesor del núcleo " ( 3.5 cm. = 1.38 Pulg. ).
- 5a.- Desde el punto determinado en el inciso 4 dibujar una recta horizontal hacia la derecha hasta intersectar la escala B - B.
- 5b.- Desde el punto determinado en el inciso 4 dibujar una recta vertical hasta intersectar la curva directamente arriba y desde este nuevo punto trazar una recta horizontal hacia la derecha hasta intersectar la escala B' B'.

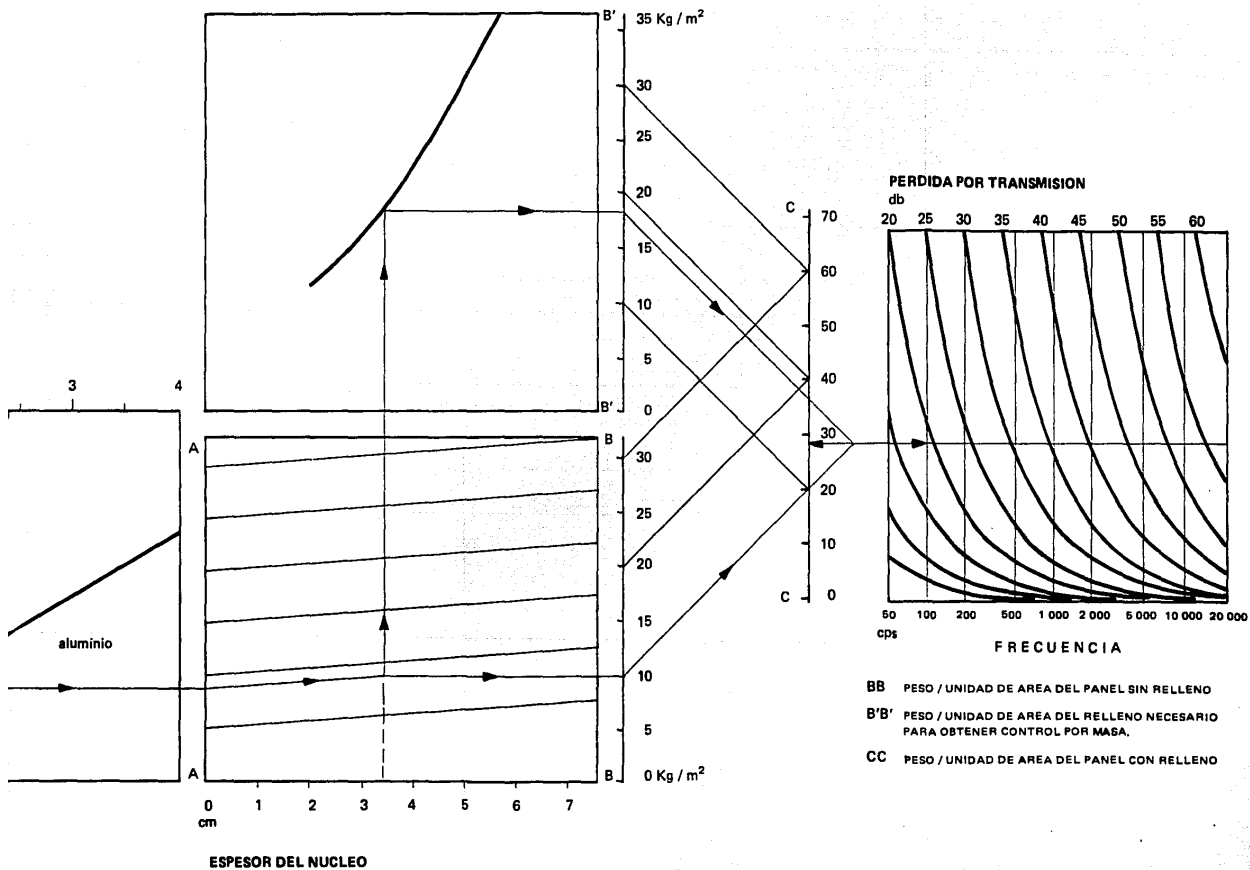
- 6.— Desde los puntos determinados en los incisos 5a y 5b trazar rectas inclinadas  $45^\circ$ , hasta que ambas se intersecten.
- 7.— Desde el punto determinado en el inciso 6 trazar una recta horizontal hasta la escala C – C y ahí leer el peso total (panel y relleno) por unidad de área, mínimo necesario para obtener control por masa.
- 8.— Desde el punto determinado en el inciso 6 trazar una horizontal hacia la derecha para obtener la pérdida por transmisión correspondiente a cada frecuencia cuando se tiene control para masa.

Para paneles sin relleno granular, con cubierta de aluminio ó acero, la pérdida de energía sónica para cada frecuencia se determina aproximadamente con el nomograma " Variación de la pérdida de energía sónica por transmisión con la frecuencia "

**NOMOGRAMA PARA CALCULAR LA PERDIDA DE ENERGIA SONICA POR TRANSMISION**

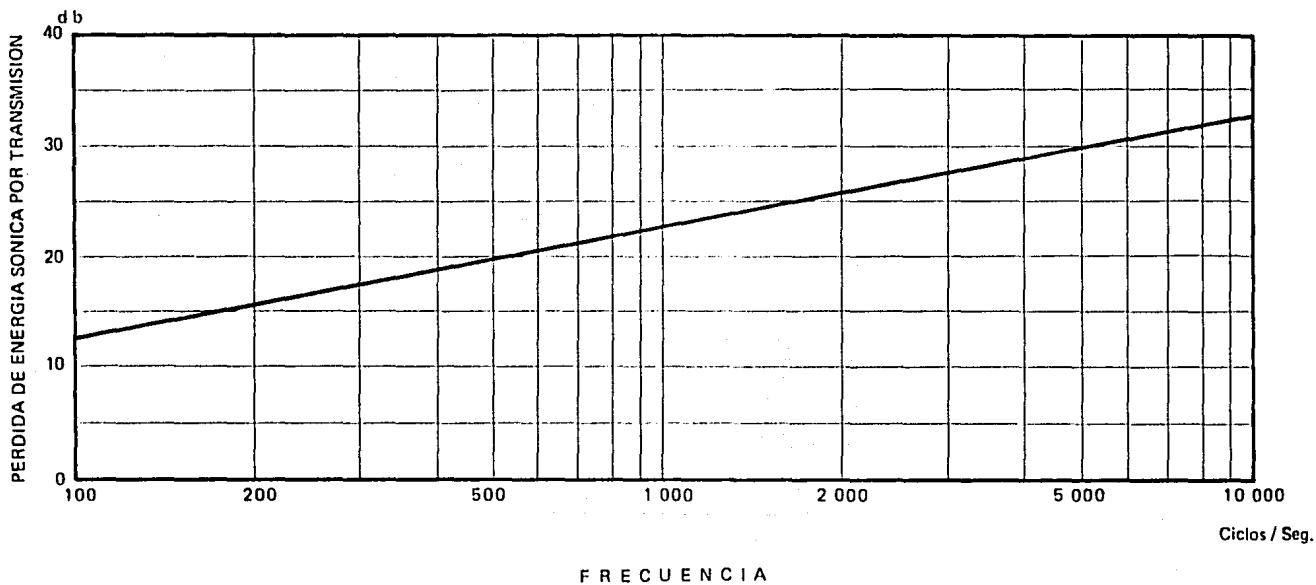


**LA PERDIDA DE TRANSMISION**





## VARIACION DE LA PERDIDA DE ENERGIA SONICA POR TRANSMISION CON LA FRECUENCIA\*



\* Para paneles con cubiertas de aluminio ó acero y núcleo celular.

## COEFICIENTE DE REFLEXION

El coeficiente de reflexión indica la capacidad de un cuerpo para reflejar el sonido que incide en su superficie.

$K_r$  = coeficiente de reflexión.

$$K_r = \frac{\text{energía sónica que se refleja}}{\text{energía sónica que incide}}$$

$$0 < K_r < 1$$

Los valores 0 y 1 nunca se obtienen en la práctica.

El valor 0 correspondería a un material que absorbiese toda la energía sónica que incide en su superficie.

( energía sónica reflejada = 0 ).

El valor 1 correspondería a un material que reflejase íntegramente la energía sónica que incide en su superficie.

( energía sónica reflejada = energía sónica que incide ).

En los materiales para construcción de viviendas, oficinas y fábricas es deseable un bajo coeficiente de reflexión ( valores próximos a cero ) con objeto de atenuar los sonidos generados en el interior.

El valor del coeficiente de reflexión de un panel depende fundamentalmente de los materiales empleados en las cubiertas.

## ENSAYE

El diseño de paneles estructurales se puede basar, con seguridad, en datos obtenidos del ensaye de especímenes de prueba, no obstante que un panel es un elemento ortotrópico no homogéneo.

### PROCEDIMIENTOS DE ENSAYE

Los procedimientos de ensaye para paneles estructurales, han sido establecidos por MIL y aceptados por ASTM.

La mayor parte de las pruebas se realizan con una máquina universal para ensaye de materiales.

Los especímenes provienen de paneles más grandes fabricados normalmente y salvo que se especifique otra cosa, se estabilizan a una temperatura de  $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  y una humedad relativa de  $50\text{ }^{\circ}/\text{o} \pm 5\text{ }^{\circ}/\text{o}$ .

Los especímenes constituídos por núcleo celular sin cubiertas, cuando tienen 2.5 cm. o más de espesor se deben preparar impregnando con epoxi ambos extremos de las celdillas tubulares hasta una profundidad de 6 mm.

La impregnación se realiza por inmersión en resina epoxi de fraguado a temperatura ambiente.

Para evitar protuberancias, el lado impregnado se asienta sobre una superficie plana y no adherente mientras fragua el epoxi.

## PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA DE UN NÚCLEO A LA COMPRESIÓN EN LA DIRECCIÓN " T " .

Los especímenes para ensaye pueden ser:

1. Con cubiertas planas y delgadas  
Espesor cualquiera
2. Sin cubiertas y sin preparación  
Espesor menor de 2,5 cm.
3. Sin cubiertas con preparación con epoxi  
Espesor igual ó superior a 2.5 cm.

Es preferible emplear especímenes con cubiertas planas delgadas.

La carga se aplica mediante una platina con articulación esférica para que sea normal.

La velocidad de aplicación de la carga debe ser tal que la falla ocurra de 3 a 6 minutos después de empezar a cargar.

El esfuerzo último del núcleo a la compresión en la dirección T se calcula con la fórmula:

$$f_u = \frac{P_u}{ab}$$

Experimentalmente se ha encontrado que en los núcleos celulares la resistencia a la compresión disminuye al aumentar el espesor.

## PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR EL MÓDULO DE ELASTICIDAD DE UN NÚCLEO A LA COMPRESIÓN EN LA DIRECCIÓN " T ".

Los especímenes para ensaye pueden ser:

1. Con cubiertas planas y delgadas  
Espesor igual ó superior a 10 cm.
2. Sin cubiertas, con preparación con epoxi  
Espesor igual ó superior a 10 cm.

Es preferible emplear especímenes con cubiertas planas delgadas.

La carga se aplica mediante una platina con articulación esférica para que sea normal.

Las deformaciones se miden con un micrómetro acoplado.

El módulo de elasticidad se calcula aplicando la Ley de Hooke.

$$E = \frac{f}{\epsilon}$$

$$f = \frac{P}{a b}$$

$$\epsilon = \frac{\Delta}{t_n}$$

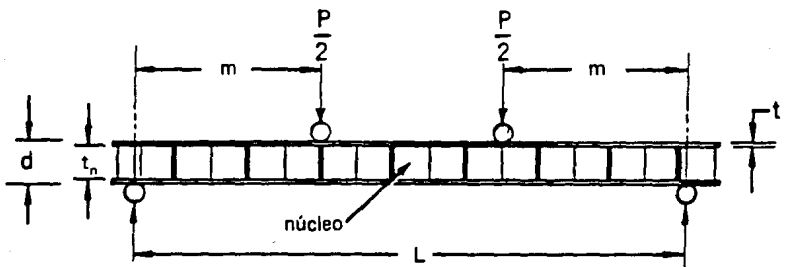
$\Delta$  = deformación del núcleo medida con el micrómetro.

En los núcleos celulares, el módulo de elasticidad a la compresión aumenta al aumentar el espesor.

## PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA DEL NÚCLEO DE UN PANEL AL ESFUERZO CORTANTE GENERADO POR FLEXION

Las cargas se aplican mediante cuchillas con articulación esférica, para asegurar que sean normales a las cubiertas.

La flecha se mide con un micrómetro.



$$m = \frac{L}{3}$$

Es usual emplear especímenes de 6 cm. de espesor por 20 cm. de ancho, por 84 cm. de largo, con cubiertas delgadas.

Las cubiertas gruesas distorsionan los resultados porque toman una parte considerable de la fuerza cortante.

Cuando el núcleo es celular, se debe anotar su orientación.

**El espécimen se diseña de manera que cumpla las especificaciones siguientes:**

1.-  $3d < m < 8d$

2.- Cuando el núcleo falle por esfuerzo cortante, el esfuerzo en las cubiertas debe ser inferior al esfuerzo de fluencia.

3.- 
$$\frac{f_b}{v_{nu}} > 2 \frac{m}{t}$$

$f_b$  = esfuerzo de fluencia de las cubiertas

$v_{nu}$  = esfuerzo cortante último del núcleo

**La falla por esfuerzo cortante de un núcleo celular se evidencia por los pliegues a  $45^\circ$  que se forman en la pared de las celdillas.**

## ESFUERZO CORTANTE ULTIMO EN EL NUCLEO

$$v_n = \frac{V}{bh} \quad (1)$$

$$V = \frac{P_u}{2} \quad (2)$$

Sustituyendo (2) en (1)

$$v_n = \frac{P_u}{2bh}$$

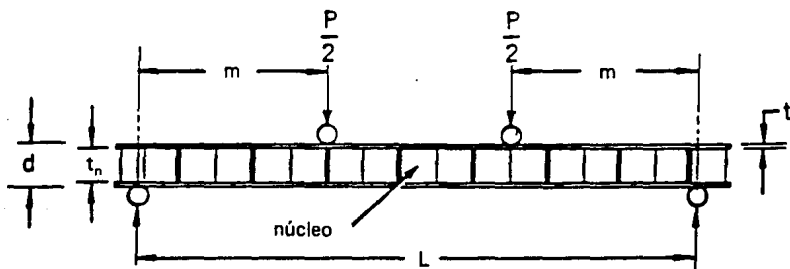
En los núcleos celulares, la resistencia al esfuerzo cortante generado por flexión disminuye al aumentar el espesor.



## PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR EL ESFUERZO DE FLUENCIA DE LAS CUBIERTAS DE UN PANEL

Se prefiere la prueba de flexión a la de compresión de canto por la dificultad de cargar igualmente las dos cubiertas.

Las cargas se aplican mediante cuchillas con articulación esférica para asegurar que sean normales a las cubiertas.



$$m = \frac{L}{3} \quad \text{ó} \quad m = \frac{L}{4}$$

Es usual emplear especímenes de 6 cm. de espesor, por 20 cm. de ancho, por 84 cm. de largo.

El espécimen se diseña de manera que se cumpla:

$$\frac{f_b}{v_{nu}} < \frac{1}{2} \frac{m}{t}$$

$f_b$  = esfuerzo de fluencia de las cubiertas

$v_{nu}$  = esfuerzo cortante último del núcleo

#### ESFUERZO DE FLUENCIA DE LAS CUBIERTAS

$$f = \frac{M}{I} y_{m \max} \quad (1)$$

$$M_u = \frac{P_u}{2} m \quad (2)$$

$$I = \frac{b (d^3 - t_n^3)}{12} \quad (3)$$

$$y_{m \max} = \frac{h}{2} = \frac{d + t_n}{4} \quad (4)$$

Sustituyendo (2), (3) y (4) en (1)

$$f_b = \frac{P_u}{2} m \cdot \frac{12}{b (d^3 - t_n^3)} \cdot \frac{d + t_n}{4}$$

$$f_b = \frac{3}{2} \frac{P_u m (d + t_n)}{b (d^3 - t_n^3)}$$

## **PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA DE UN PANEL A LA TENSION NORMAL A LAS CUBIERTAS**

La prueba se realiza en una máquina universal para ensaye de materiales, provista de correderas de alineación para asegurar que las fuerzas de tensión que se aplican sean colineales.

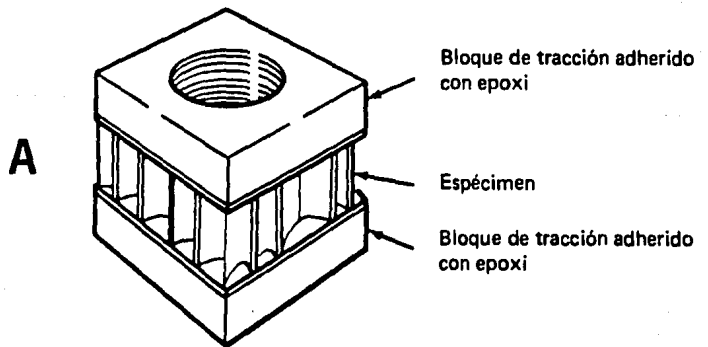
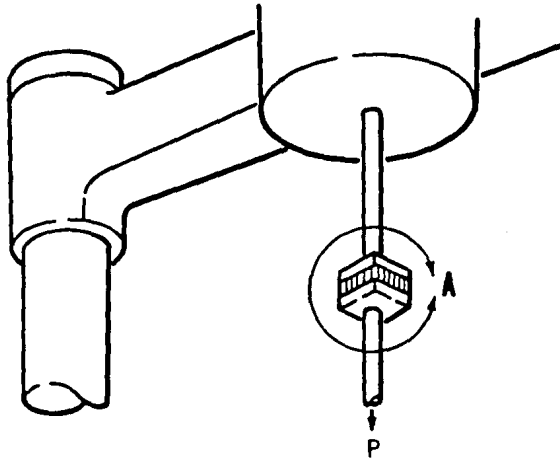
Las fuerzas de tensión se transmiten al especimen mediante bloques de tracción de aluminio, de base cuadrada, de 5 cm. de lado y 2.5 cm. de espesor, que se adhieren a las cubiertas del especimen con resina epóxica de alta resistencia.

La base de cada bloque de tracción debe coincidir con la cubierta a la que se adhiere.

El esfuerzo último del panel a la tensión normal a las cubiertas se calcula con la fórmula.

$$f_u = \frac{P_u}{a.b}$$

# PRUEBA DE TENSION



## **PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA AL ARRANCAMIENTO**

### **APARATO**

La prueba se realiza con el aparato denominado "de cilindro ascendente".

### **ESPECIMEN**

El espécimen se fabrica con cubiertas muy flexibles (de aluminio, de 0.5 mm. de espesor), para que los resultados se distorsionen lo menos posible por la rigidez de las cubiertas.

### **TARA**

La tara del aparato es la carga que equilibra el peso de la parte móvil (cilindro y poleas).

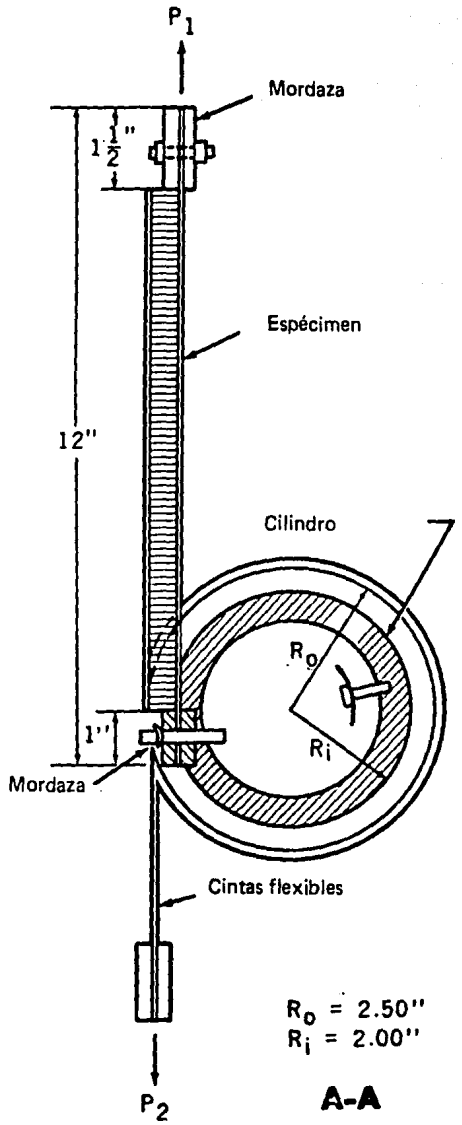
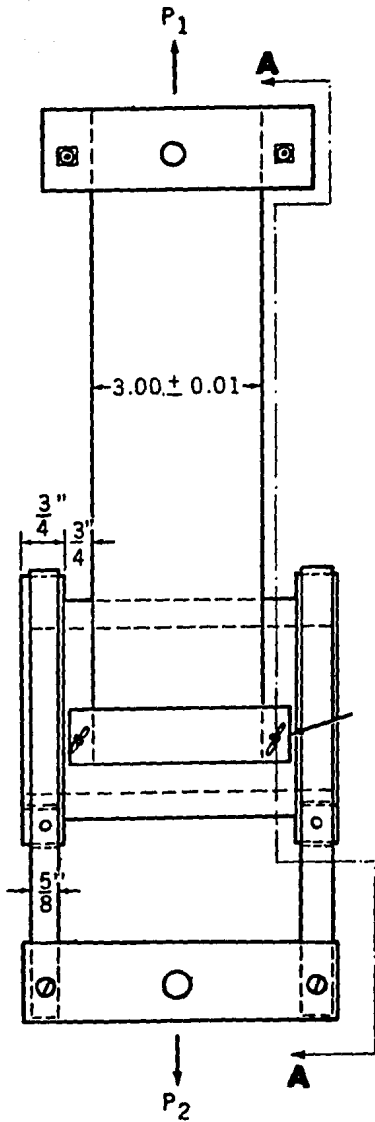
Se determina sustituyendo el espécimen por una lámina igual a la empleada en las cubiertas y aplicando carga gradualmente hasta que se inicia el movimiento.

### **PROCEDIMIENTO**

Se arma el aparato

Se aplica la carga incrementándola gradualmente hasta que el cilindro empieza a rodar sobre el espécimen, arrancando la cubierta y enrollándola sobre su superficie.

# PRUEBA DE ARRANCAMIENTO



$$R_o = 2.50''$$
$$R_i = 2.00''$$

**A-A**

## CALCULO

La resistencia al arrancamiento se determina aplicando la fórmula

$$M_0 = \frac{(P_1 - P_2) (R_0 - R_1)}{b}$$

$M_0$  = resistencia al arrancamiento.

Se expresa en Kg. cm / cm de ancho

$P_1$  = carga que produjo el arrancamiento

$P_2$  = tara del aparato

$R_0$  = radio de las poleas en las que se aplica la carga

$R_1$  = radio del cilindro en el que se enrolla la cubierta.

$b$  = ancho del especimen

Generalmente es el adhesivo el que falla, pero en algunos casos el núcleo se rompe.

En cada prueba se debe anotar como se produjo la falla y si el núcleo es celular, su orientación.

## PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA DE UN PANEL A LA CARGA RODANTE.

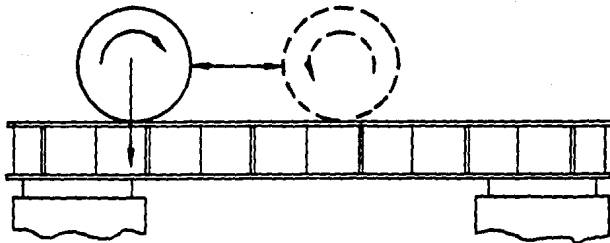
El panel se apoya libremente

La carga, con una magnitud de 453.5 Kg. se aplica mediante un cilindro de acero fundido de 6.3 cm. de largo y 20.3 cm. de diámetro que se hace rodar, alternando su sentido, a lo largo del panel.

La falla se produce porque la cubierta se rompe ó porque el núcleo se aplasta.

La resistencia del panel se mide por el número de pasadas que producen la falla.

Los paneles para entrepiso se deben someter a la prueba de la carga rodante.





## **PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA DEL ADHESIVO AL DESLIZAMIENTO GENERADO POR FUERZA CORTANTE**

Considérese un panel simplemente apoyado bajo la acción de una carga concentrada aplicada en el centro del claro.

La flexión genera una fuerza cortante rasante que trata de hacer que la cubierta se desplace respecto al núcleo.

Algunos adhesivos ceden con el tiempo a la acción de esta fuerza cortante rasante.

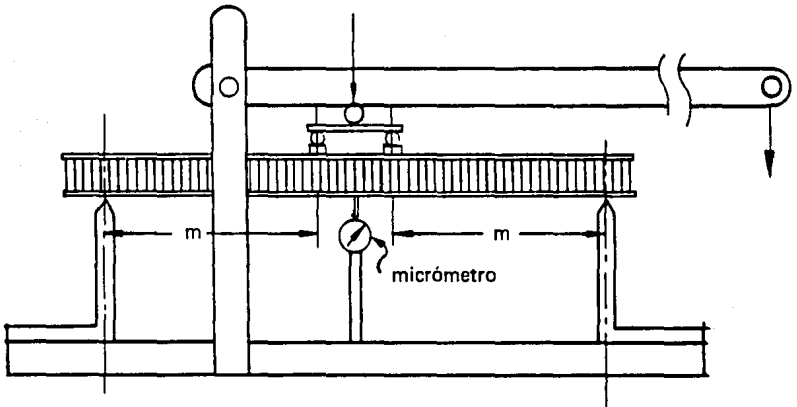
El desplazamiento de las cubiertas respecto al núcleo se manifiesta por un incremento en la deflexión inicial del panel, de manera que se puede tomar el incremento en la deflexión como un índice del desplazamiento de las cubiertas. Este es el fundamento de la prueba de resistencia del adhesivo al deslizamiento, que se conduce como indica la especificación MIL - S - 7810.

Las dimensiones del espécimen son 1.2 cm. de espesor, 7.6 cm. de ancho y 30.5 cm. de largo y se fabrica con cubiertas de aluminio de 0.5 mm. de espesor.

El claro es de 25.4 cm.

La carga que se aplique debe ser tal que los esfuerzos de tensión y compresión en las cubiertas sean inferiores al esfuerzo de fluencia y los esfuerzos cortantes que se generan en el núcleo sean menores que un tercio de su resistencia al esfuerzo cortante.

Las cargas se aplican durante 7 días, midiendo y anotando la deflexión cada 24 horas.



El resultado se expresa como tasa de deslizamiento. Es el promedio de la deflexión sufrida por el espécimen en los últimos 6 días de una prueba de 7 días.

$$v/\phi = \frac{y_7 - y_1}{6}$$

$\gamma/\varphi$  = índice que valua la resistencia del adhesivo al deslizamiento

$\gamma_7$  = deflexión al cumplirse 7 días de haber aplicado la carga.

$\gamma_1$  = deflexión al cumplirse 1 día de haber aplicado la carga.

Para determinar si la resistencia del adhesivo al deslizamiento generado por fuerza cortante es aceptable, se compara el índice obtenido con valores pre-determinados para cada tipo de adhesivo.

## **PROCEDIMIENTO PARA CONTROLAR LA CALIDAD DEL ADHESIVO**

**La prueba se realiza con una máquina universal de ensaye de materiales, sometido a tracción dos láminas de aluminio de 1.6 mm. de espesor y 25.4 mm. de ancho, traslapadas 12 mm. y unidas con el adhesivo en estudio.**

**La carga se aplica a un ritmo de 544 Kg / min.**

## **PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA DEL NUCLEO AL IMPACTO.**

El aparato con el que se efectúa esta prueba consiste en una placa horizontal sobre la que se fija firmemente el espécimen y una placa de 6.8 Kg. de peso, deslizante verticalmente, guiada por correderas que la mantienen horizontal para asegurar que la carga de choque se aplica uniformemente sobre toda la muestra.

El espécimen es un cubo de 10 cm. de arista. Las caras que reciben el impacto deben tener cubiertas metálicas ó preparación con epoxi.

La resistencia del núcleo al impacto se expresa por el producto del peso de la placa deslizante en Kg. por la altura de caída en cm. que causó la falla del espécimen.

## **PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA A LA FATIGA**

### **ESPECIMENES:**

Paneles con cubierta metálica y núcleo celular de paoel impregnado en resina.

### **PROCEDIMIENTO:**

Los especímenes se someten a flexión repetida, aplicando una carga cíclica con una frecuencia de 1 000 ciclos / minuto.

La carga debe ser tal, que los esfuerzos que genere en las cubiertas sean el 50 % de su esfuerzo de fluencia.

### **RESULTADO:**

En un grupo de paneles ensayados, la falla por fatiga se produjo después de 1.5 millones de ciclos.

## **PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA A LOS HONGOS**

Procedimiento MIL - E - 5272.

### **ESPECIMENES:**

Paneles con cubiertas de aluminio y núcleo celular de papel impregnado en resina.

### **PROCEDIMIENTO:**

Un grupo de especímenes es sometido a la acción de los hongos durante 28 días y estabilizado, otro grupo testigo no es expuesto a la acción de los hongos.

Todos los paneles se ensayan aplicando el procedimiento para determinar la resistencia de un núcleo celular a la compresión en la dirección T.

Se compara la resistencia promedio del grupo expuesto con la resistencia promedio del grupo testigo.

## **PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA A ALTAS TEMPERATURAS**

Procedimiento ASTM E – 119 – 50 modificado.

**ESPECIMENES:** Paneles con cubiertas de acero de 1.07 mm. de espesor, con núcleo celular de papel impregnado en resina, de 10 cm. de espesor, con relleno de perlita.

**PROCEDIMIENTO:** El espécimen se coloca libremente apoyado en un claro de 7.30 m., se le aplica una carga uniforme de 122 Kg / m<sup>2</sup> y se somete a una temperatura de 732 °C durante dos horas.

El panel no debe fallar.



## **PRUEBAS DE COMBUSTIBILIDAD Y RESISTENCIA AL FUEGO DE PANELES CON CUBIERTAS METALICAS.**

### **ESPECIMENES:**

No. 1	20 cm.	x	20 cm.	x	6.3 cm.
No. 2	61 cm.	x	61 cm.	x	5.0 cm.
No. 3	61 cm.	x	61 cm.	x	7.5 cm.
No. 4	61 cm.	x	61 cm.	x	10.0 cm.

### **PROCEDIMIENTO:**

El espécimen No. 1 se sujetó a la prueba de seguridad de la FAA. Los especímenes Nos. 2, 3 y 4 se expusieron a la flama durante 25 minutos.

### **RESULTADOS**

El espécimen No. 1 satisfizo los requisitos de la FAA muy fácilmente, no se observó ignición.

Los especímenes Nos. 2, 3 y 4 mostraron carbonización y contracción del núcleo pero la ausencia de ceniza indicó que no hubo combustión (rápida oxidación) dentro del panel.

### **CONCLUSION**

Los paneles con núcleo celular de papel impregnado en resina y cubiertas metálicas sin protección adicional no resisten altas temperaturas sostenidas; el núcleo se carboniza sin producir flama.

## RESISTENCIA A LA HUMEDAD DE NUCLEOS CELULARES

### PROCEDIMIENTO

- 1.— Las muestras de núcleo celular, sin cubiertas, se mantienen a una determinada humedad relativa constante durante 30 días.
- 2.— Se fabrican los especímenes con cubiertas de lámina de aluminio y con las dimensiones establecidas por ASTM para las pruebas de resistencia a la compresión directa y de resistencia al esfuerzo cortante.
- 3.— Se realizan las pruebas de acuerdo a los procedimientos definidos por ASTM.

### RESULTADOS PARA UN NUCLEO CELULAR AIRCOMB 60 - 20 - 40

#### RESISTENCIA A LA COMPRESION DIRECTA

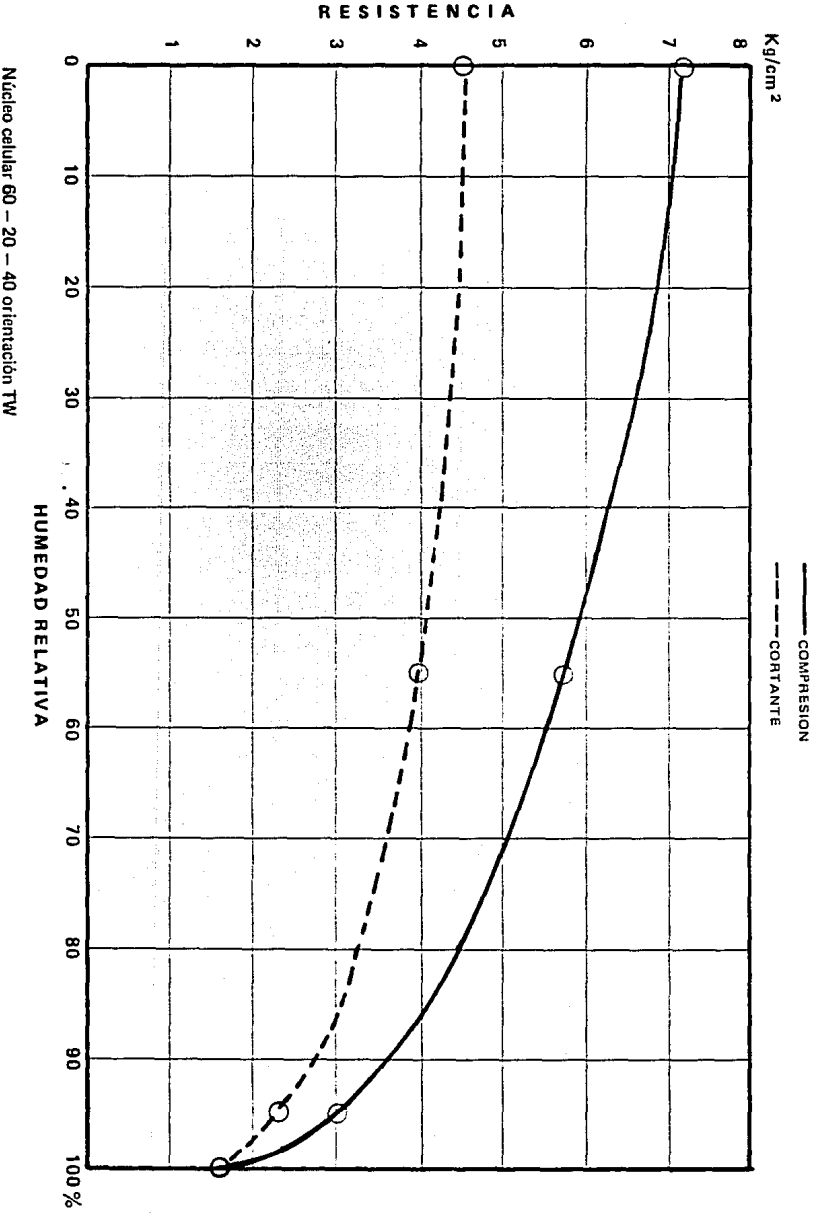
HUMEDAD RELATIVA	RESISTENCIA $\frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$	°/o DE LA RESISTENCIA MAXIMA
0 °/o	7.17	100
50 °/o	5.90	82.3
100 °/o	1.69	23.5

#### RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE GENERADO POR FLEXION

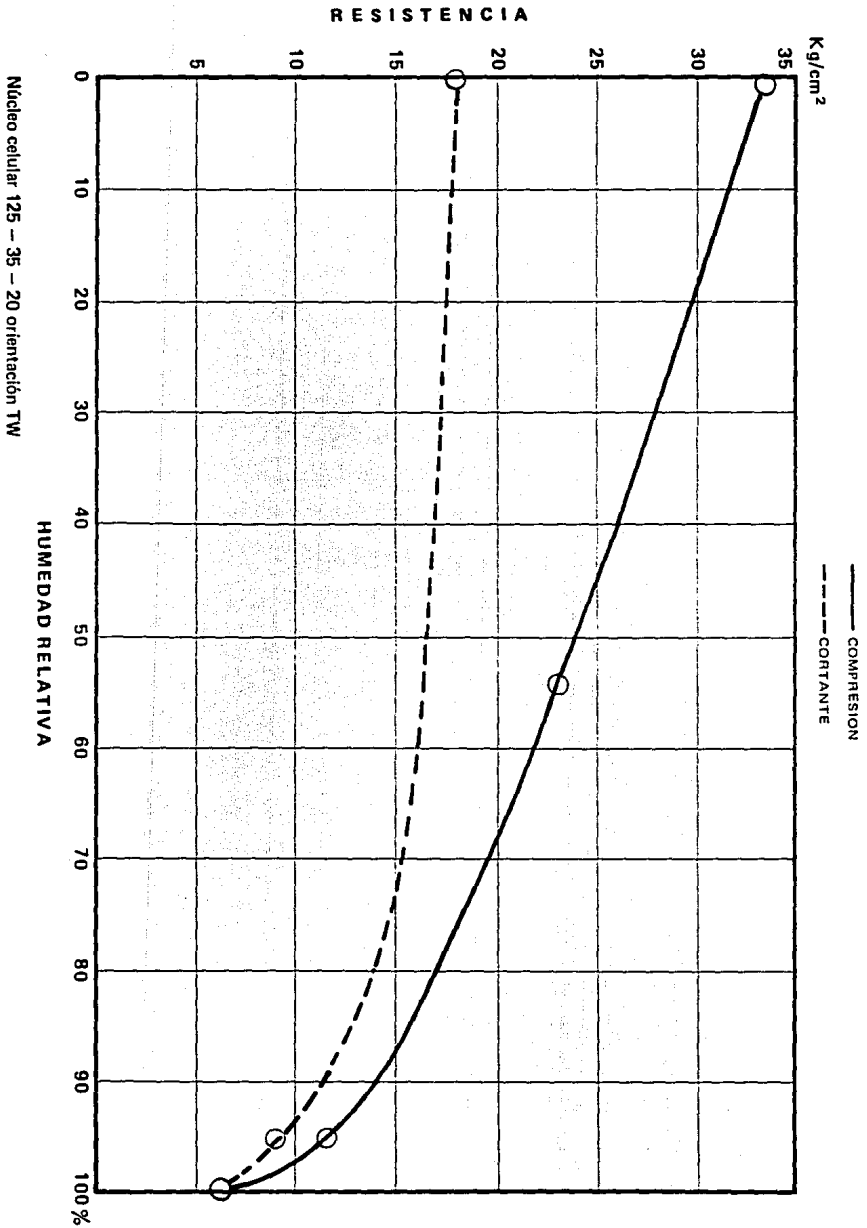
HUMEDAD RELATIVA	RESISTENCIA $\frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$	°/o DE LA RESISTENCIA MAXIMA
0 °/o	4.57	100
50 °/o	4.08	89.3
100 °/o	1.69	37.0

Una vez construido el panel, la condensación de la humedad del pequeño volumen de aire que contiene cada celdilla, aún en las condiciones más críticas, no afecta la resistencia del núcleo.

VARIACION DE LA RESISTENCIA DE UN NUCLEO CELULAR A LA COMPRESION  
Y AL CORTANTE GENERADO POR FLEXION CON LA HUMEDAD



VARIACION DE LA RESISTENCIA DE UN NUCLEO CELULAR A LA COMPRESION  
Y AL CORTANTE GENERADO POR FLEXION CON LA HUMEDAD



# INTEMPERISMO

## AGENTES DE INTEMPERISMO MAS FRECUENTES

1. Radiación solar
2. Calor ó frío intenso
3. Corrosión:  
Ambiente marino  
Ambiente industrial
4. Humedad
5. Abrasión
6. Hongos

## **PRUEBAS DE RESISTENCIA AL INTEMPERISMO**

Tienen por objeto determinar la variación de las propiedades de los componentes de un panel estructural ( cubiertas, adhesivo y núcleo ) por la acción del intemperismo, en función del tiempo, para disponer de la información necesaria para diseñar y para pronosticar su vida útil.

La resistencia al intemperismo se puede determinar:

- 1. Por exposición al ambiente natural**
- 2. Por envejecimiento acelerado en laboratorio, estableciendo previamente su correlación con el intemperismo natural.**

## **ESPECIMENES PARA EXPOSICION AL INTEMPERISMO**

**Los especímenes para exposición son paneles cuadrados de 38 cm. de lado y 1.3 cm. de espesor, con los bordes expuestos para que el intemperismo actúe sobre todos los componentes del panel.**

**Los especímenes se fabrican con materiales, equipo, personal y procedimientos normales, se curan y se cortan con sierra al tamaño especificado.**

**De cada tipo de panel se fabrica un grupo para cada sitio de exposición y un grupo testigo que se almacena protegido del intemperismo.**

**Cada grupo de paneles de un mismo tipo se divide en 3 subgrupos para ser ensayados al final de 1, 2 y 3 años de exposición.**

## PROCEDIMIENTO DE ENVEJECIMIENTO ACELERADO EN LABORATORIO

### Procedimiento ASTM C - 481 - 61 - T

1. Sujetar al espécimen 6 veces al ciclo A ó al ciclo B, con un intervalo entre ciclos no mayor de 30 minutos.

#### CICLO A

- a. Sumergir al espécimen, manteniendo sus cubiertas horizontales, en agua a  $49 \pm 2$  °C durante una hora.
- b. Rociar con vapor de agua a  $93 \pm 3$  °C durante tres horas.
- c. Almacenar a ( $-12 \pm 3$  °C) durante 20 horas.
- d. Calentar con aire seco a  $99 \pm 2$  °C durante tres horas\*.
- e. Rociar con vapor de agua a  $93 \pm 3$  °C durante tres horas.
- f. Calentar con aire seco a  $99 \pm 2$  °C durante 18 horas\*.

\* La humedad relativa del aire debe ser como máximo 10 % y se debe hacer circular por medio de un ventilador para calentar uniformemente todas las caras.



## CICLO B

- a. Sumergir al espécimen, manteniendo sus cubiertas horizontales, en agua a  $49 \pm 2$  °C durante una hora.
  - b. Rociar con agua caliente a  $71 \pm 3$  °C durante tres horas.
  - c. Almacenar a  $-40 \pm 3$  °C durante 20 horas.
  - d. Calentar con aire seco a  $71 \pm 3$  °C durante tres horas.
  - e. Rociar con agua caliente a  $71 \pm 3$  °C durante tres horas.
  - f. Calentar con aire seco a  $71 \pm 3$  °C durante 18 horas.
2. Después de completar los 6 ciclos, llevar al espécimen a peso constante  $\pm 1$  % colocándolo en un ambiente con temperatura de  $23 \pm 1$  °C y humedad relativa de  $50 \pm 2$  .

Anotar el tiempo requerido para llegar a peso constante.

## PROCEDIMIENTOS DE ENSAYE

Cada espécimen expuesto se corta con sierra en:

Especímenes de 5 x 7.5 cm. para ensayarlos a compresión de canto (paralela a las cubiertas).

Especímenes de 3.75 x 15 cm. para ensayarlos a flexión de plano.

Especímenes de 10 x 10 cm. para ensayarlos a compresión de plano (normal a las cubiertas).

Las pruebas se efectúan de acuerdo con los procedimientos de la ASTM C-364-57, C-365-57 y C-393-57.

Los resultados de las pruebas de compresión de canto y de flexión de plano revelan fundamentalmente, los efectos del intemperismo en las cubiertas y en el adhesivo.

Los resultados de las pruebas de compresión de plano revelan fundamentalmente los efectos del intemperismo en el núcleo.

## **EVALUACION DE LA RESISTENCIA AL INTEMPERISMO DE PANELES CON NUCLEO CELULAR**

**El comité C – 19 de la ASTM, el Laboratorio de Productos Forestales del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos y la Compañía Douglas Aircraft realizaron un programa de pruebas para evaluar la resistencia al intemperismo de paneles estructurales y materiales para núcleo.**

**El programa consistió en:**

- Cinco ciclos de intemperismo natural**
- Seis ciclos de intemperismo acelerado**

**Los agentes de intemperismo natural que actuaron sobre los especímenes fueron:**

- Atmosfera salina**
- Rayos directos del sol**
- Arena impulsada por el viento**
- Arena húmeda adherida a la superficie**
- Lluvia**
- Nieve**
- Hielo**
- Vientos huracanados.**

## CONCLUSIONES

1. Los cinco ciclos de intemperismo natural y los seis ciclos de intemperismo acelerado produjeron una muy pequeña disminución de la resistencia de los paneles ensayados.
2. Las cubiertas debidamente adheridas dieron una protección efectiva al núcleo.
3. Los materiales fabricados con resinas fenólicas ó poliésteres sufren fuerte pérdida de resistencia al ser expuestos al intemperismo, especialmente por la acción de los rayos ultravioletas.  
  
Este inconveniente se elimina protegiendo con una capa de recubrimiento pigmentado.
4. La resistencia al intemperismo de los adhesivos fue excelente.
5. Un factor crítico en el diseño de paneles es la posible corrosión de las cubiertas, que se evita con una adecuada selección del material y una efectiva protección.
6. El material del núcleo, expuesto al intemperismo sin la protección de las cubiertas, después de 5 años presentó el 35 % de su resistencia original a la tensión y el 55 % de su resistencia original a la compresión.

En resumen, el programa mostró que los paneles estructurales, cuando están correctamente ensamblados resisten muy bien el intemperismo severo y se pueden usar con la seguridad de un funcionamiento bueno y durable.

## **PROCEDIMIENTOS DE CONSTRUCCION**

## UNION MEDIANTE ADHESIVO DE LAS CUBIERTAS CON EL NUCLEO

El adhesivo empleado en la unión de las cubiertas con el núcleo debe resistir:

- 1.— La fuerza cortante paralela a las cubiertas que se genera al impedir que las cubiertas se deslicen respecto al núcleo, por efecto de la flexión del panel.
- 2.— La fuerza de tensión normal a las cubiertas que se genera al impedir que la cubierta sometida a compresión se ondule.

Puesto que una cubierta sometida a compresión de canto está igualmente propensa a ondularse hacia el interior ó hacia el exterior, la resistencia a la tensión del adhesivo no necesita ser mayor que la resistencia a la compresión del núcleo.

En general, la resistencia a la tensión y al cortante de los adhesivos disminuye con la temperatura, por lo que en la selección del adhesivo se debe considerar la temperatura de operación.

En la construcción de paneles se debe cuidar que los elementos de borde y los insertos no impidan el contacto del núcleo con las cubiertas ni la aplicación de la presión adecuada durante el proceso de ensamble.

Es conveniente que el diseño de los elementos de borde y de los insertos les permita comportarse elásticamente al recibir la presión de ensamble.

## **UNION MEDIANTE ADHESIVO DE LAS CUBIERTAS CON UN NUCLEO CELULAR.**

La unión de las cubiertas con un núcleo celular se realiza mediante cordones de adhesivo, de sección triangular bisectada por la pared de las celdillas.

Los adhesivos epóxicos y fenólico-epóxicos son los que presentan las mejores características de auto-acordonamiento.

La aplicación de una base vinil-fenólica favorece el auto-acordonamiento del adhesivo.

Cuando el peso es importante (aplicaciones aeronáuticas ó astronáuticas), el adhesivo se debe aplicar al núcleo celular en vez de aplicarlo a toda la superficie de las cubiertas.

## **EMPALME DE CUBIERTAS**

**Para fabricar paneles de mayor tamaño que las cubiertas prelamadas disponibles es necesario empalmar las cubiertas.**

**Existen dos tipos fundamentales de empalme:**

- **Por tanslape**
- **Por una tira interior de unión**

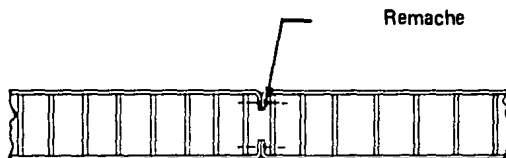
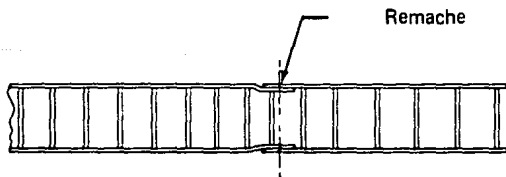
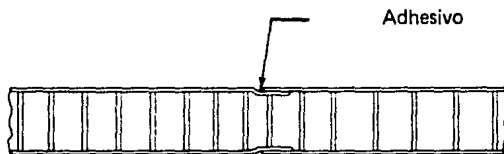
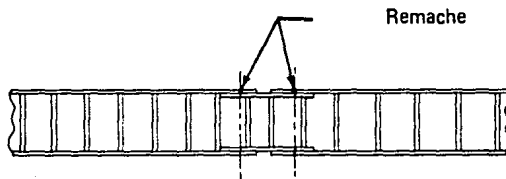
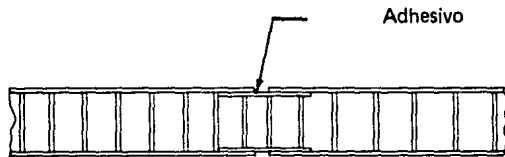
**La unión se puede diseñar con adhesivo ó con remaches, calculando el ancho de la faja de adhesivo ó el número de remaches que se requiere para transmitir los esfuerzos generados.**

**Ambos tipos de empalme pueden satisfacer los requerimientos de resistencia mecánica y de hermeticidad, dependiendo la elección de la presentación que se desea.**

**Se debe evitar la unión a tope porque no garantiza ni la resistencia mecánica ni la hermeticidad.**



## EJEMPLOS DE UNIONES DE CUBIERTAS



## **SOBREPOSICION DE ELEMENTOS LAMINADOS EN LAS CUBIERTAS**

El objeto de sobreponer elementos laminados en la constitución de las cubiertas puede ser:

- 1.— **PARA REFORZAR**, porque algunas zonas de las cubiertas requieren mayor resistencia.

Se emplea el mismo material laminado y adhesivo de curado compatible con el empleado en la unión del núcleo con las cubiertas, para realizar el curado en una sola operación.

- 2.— **PARA FORMAR CUBIERTAS COMPUESTAS**, porque se requiere reunir las propiedades de materiales distintos ( por ejemplo, la resistencia mecánica del acero con el aislamiento térmico del plástico reforzado ).

Cuando los materiales que formarán la cubierta tienen coeficientes de dilatación notablemente distintos, se recomienda colocar la sobrecubierta después de fabricado el panel, usando un adhesivo que requiera temperatura de curado baja con objeto de evitar introducir tensiones iniciales y alabeo del panel.

## **UNIONES DE EMPALME EN EL NUCLEO**

**Para formar el núcleo celular de un panel, generalmente es necesario unir varias lajas. La unión de las lajas de material celular se puede lograr:**

### **1.— Por unión a tope con adhesivo**

Se recomienda adhesivo epóxico líquido ó en pasta y nó adhesivo fenólico por la dificultad de aplicar presión durante el curado de la unión.

Una variante consiste en cortar los bordes en contacto de las lajas en forma quebrada, dentada ó de cola de milano.

### **2.— Por unión biselada con adhesivo**

Permite el uso de adhesivos que requieren presión durante el curado.

Se recomienda adhesivo en película

### **3.— Por traslape**

Se logra traslapando una faja de cada laja e incrustando una dentro de la otra por presión.

No requiere adhesivo

**Cuando se emplea adhesivo en las uniones de empalme en el núcleo, es conveniente que su curado sea compatible con el del adhesivo para unir el núcleo con las cubiertas, con objeto de realizar el curado en una sola operación.**

**Si es necesaria una gran resistencia en las uniones de empalme en el núcleo, al fabricar el panel se llenan las celdillas del ensamble con adhesivo líquido ( preferentemente de tipo epóxico ).**

## **FABRICACION DE PANELES ESTRUCTURALES CON CUBIERTAS METALICAS, NUCLEO CELULAR Y ADHESIVO TERMOPLASTICO.**

Las cubiertas y el núcleo se procesan en paralelo

### **PROCESO DE LAS CUBIERTAS**

- 1.- Cortar al tamaño y forma que se requiere
- 2.- Lavar y desengrasar
- 3.- Secar
- 4.- Aplicar el adhesivo dentro de las 3 horas siguientes a la terminación del secado.
- 5.- Secar a la temperatura ambiente durante 30 minutos
- 6.- Secar en horno de aire seco a 88 °C y con velocidad mínima de 90 m/min, durante 10 minutos.

## **PROCESO DEL NUCLEO**

**1.— Cortar en lajas, con el espesor y la tolerancia requeridos**

**2.— Ensamblar las lajas para cubrir el área necesaria**

**3.— Aplicar adhesivo a una de las caras del núcleo**

Si el adhesivo es del tipo polivinil—butiral, se recomienda emplear aspersor, haciendo una primera aplicación oblicuamente al plano del núcleo para formar una tela y una segunda aplicación normal al plano del núcleo para romper la tela, asegurando la formación de un buen filete de adhesivo en los bordes de las celdillas.

**4.— Secar a la temperatura ambiente durante 30 minutos**

**5.— Aplicar adhesivo a la otra cara del núcleo**

**6.— Secar a la temperatura ambiente durante 30 minutos**

**7.— Secar en horno de aire seco a 88 °C y con una velocidad mínima de 90 m/min, durante 10 minutos.**

**Preparados el núcleo y las cubiertas se procede al:**

**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

## **ENSAMBLE**

- 1.— Formar el panel
- 2.— Colocar el panel en una prensa de platos calientes a  $143 \pm 3$  °C, durante 3 minutos sin presión para activar el adhesivo y durante 20 minutos con presión ( 0.7 Kg / cm<sup>2</sup> para núcleo celular 60 – 20 ó 1.4 Kg / cm<sup>2</sup> para núcleo celular 125 – 35 ), para curar el adhesivo.
- 3.— Retirar el panel de la prensa y enfriar uniformemente hasta la temperatura ambiente.
- 4.— Limpiar el panel
- 5.— Aplicar base y pintura cuando se requiera

## **FABRICACION DE PANELES CON CUBIERTAS DE PLASTICO**

Existen fundamentalmente dos procedimientos:

- 1.— Con cubiertas fabricadas previamente al ensamble, la unión entre las cubiertas y el núcleo se realiza con adhesivo.
- 2.— Con cubiertas fabricadas simultáneamente el ensamble, la unión entre las cubiertas y el núcleo se realiza al fraguar la resina de laminación en contacto con el núcleo.

## **CONSTRUCCION DE PANELES CON CUBIERTAS DE PLASTICO O PLASTICO REFORZADO FABRICADAS PREVIAMENTE AL ENSAMBLE.**

### **TIPOS DE CUBIERTAS**

- 1.— Sin refuerzo
- 2.— Con refuerzo de fieltro ( colchoneta de fibra de vidrio ).
- 3.— Con refuerzo de tela ( de fibra de vidrio, nylon, dacrón, orlón, rayón, algodón, Etc. )



**4.- Con base de papel**

En las cubiertas sin refuerzo, las resinas más empleadas son P.V.C. y acrílicas.

En las cubiertas con refuerzo, las resinas más empleadas son poliésteres, epóxicas, fenólicas y melamínicas.

**PROCESO DE FABRICACION**

- 1.-** Si la cara de la cubierta que estará en contacto con el núcleo es tersa se debe hacer áspera con un solvente ó con abrasivo.
- 2.-** Aplicar adhesivo a la cubierta
- 3.-** Ensamblar
- 4.-** Aplicar presión hasta que fragüe el adhesivo

Para reducir el tiempo de fabricación se emplea adhesivo de curado en caliente y la presión se aplica con una prensa de platos calientes.

El adhesivo se puede aplicar con aspersor ó con rodillo

Este tipo de construcción se emplea para fabricar elementos planos ó con curvatura simple.

### CONSTRUCCION DE PANELES CON NUCLEO CELULAR Y CUBIERTAS DE PLASTICO REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO FABRICADAS SIMULTANEAMENTE AL ENSAMBLE

Existen dos procedimientos:

#### SOBRE MOLDE

- 1.— Aplicar un separador sobre el molde y esperar a que seque
- 2.— Extender alternadamente una capa de resina catalizada y un lienzo de fibra de vidrio hasta obtener el espesor requerido
- 3.— Impregnar con resina catalizada el borde de las celdillas del núcleo
- 4.— Colocar el núcleo en contacto con la cubierta antes de que fragüe la resina de laminación
- 5.— Aplicar presión durante el fraguado.

## SOBRE EL NUCLEO

- 1.- Impregnar con resina catalizada el borde de las celdillas del núcleo
- 2.- Extender alternadamente un lienzo de fibra de vidrio y una capa de resina catalizada hasta obtener el espesor requerido.

No se requiere presión, basta con no mover el panel durante el fraguado.

Para evitar que la resina fluya hacia abajo por las paredes de las celdillas, se carga hasta con un 5 % en peso de sílice coloidal (dióxido de silicio), la carga no debe impedir que la resina forme chaflanes en el borde de las celdillas.

Las resinas más empleadas para fabricar cubiertas reforzadas con fibra de vidrio son: poliéster y epoxi.

El estireno que se emplea como solvente de la resina poliéster, se gasifica durante el curado. Si la proporción de estireno es mayor de 30 %, el gas que genera puede romper o debilitar considerablemente la unión de la cubierta con el núcleo.

La fibra de vidrio debe quedar completamente cubierta por la resina.

Un factor fundamental en la durabilidad de un panel es su impermeabilidad por lo que se evitará que las cubiertas tengan poros originados por burbujas de aire apesadas en la resina de laminación.

## **ACABADO**

**El acabado de los paneles puede ser:**

**Barniz**

**Pintura**

**Esmalte**

**Tapiz**

**Ningún acabado requiere una temperatura mayor que la de curado del adhesivo.**

**A menos que los bordes del panel sean previamente sellados, se debe evitar aplicar el acabado por inmersión.**

**Algunas cubiertas no requieren un acabado, como son:**

**Aluminio**

**Acero inoxidable**

**Acero esmaltado**

**Plástico reforzado**

## **BORDES**

Los bordes de un panel se pueden formar:

- 1.— Con el material laminado de las cubiertas, doblado y unido con adhesivo ó engargolado.
- 2.— Con un marco de metal, plástico ó madera, adherido a las cubiertas.
- 3.— Con plástico moldeado en su sitio después de unir las cubiertas al núcleo.

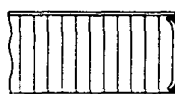
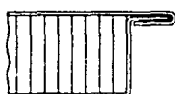
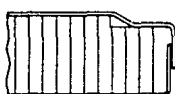
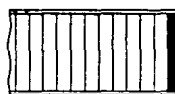
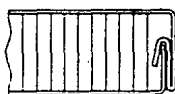
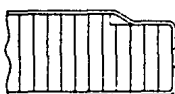
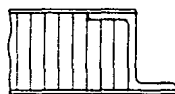
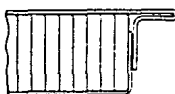
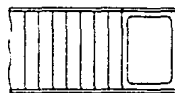
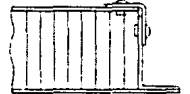
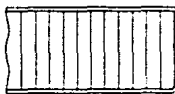
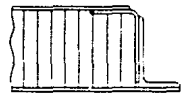
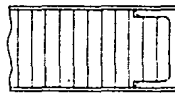
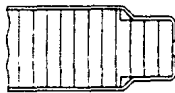
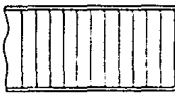
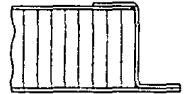
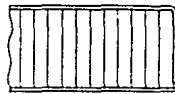
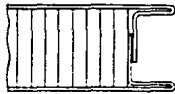
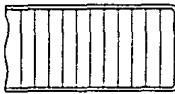
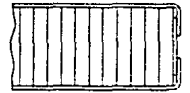
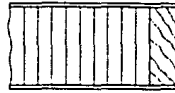
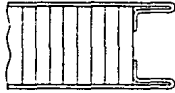
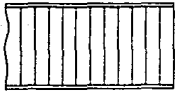
Las funciones de los bordes son:

- 1.— Permitir la unión de los paneles
- 2.— Transmitir las cargas
- 3.— Evitar el deterioro del núcleo ( especialmente por humedad ).

Al diseñar los bordes se debe considerar:

- 1.— Las cargas que deben transmitir
- 2.— Las condiciones ambientales
- 3.— Los requisitos de hermeticidad

# EJEMPLOS DE BORDES



## INSERTOS

En el diseño de paneles estructurales suelen ser críticas las cargas concentradas normales a las cubiertas, que cuando son de compresión tienden a aplastar al núcleo y cuando son de tensión tienden a arrancar la cubierta.

Para distribuir la carga concentrada y evitar el daño que podría causar al panel, se colocan insertos que pueden ser:

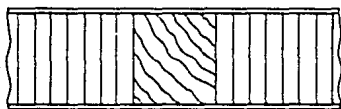
- 1.— Prefabricados: de aluminio, bronce, acero, plástico, madera, Etc. y de muy diversas formas ( cilíndrica, prismática, tubular, acampanada, Etc. )
- 2.— Moldeados en el sitio: de plástico ( generalmente epóxico )
- 3.— Mixtos

Los insertos se pueden fijar o moldear al fabricar el panel ó posteriormente.

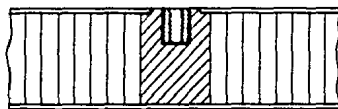
Al inserto se fijan muy diversos aditamentos ( conexiones, ménsulas, bisagras, cerraduras, jaladeras, tensores, Etc. )

Para elegir el tipo conveniente de inserto se debe tener en cuenta el tipo y magnitud de la carga por aplicar, el medio ambiente y la compatibilidad del material del inserto con los del panel.

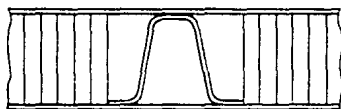
## EJEMPLOS DE INSERTOS



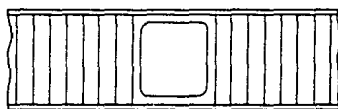
**Inserto de madera**



**Inserto vaciado en su sitio**



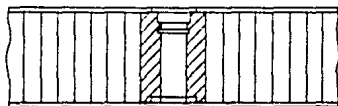
**Inserto de sombrero**



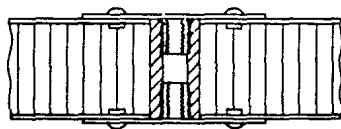
**Inserto de tubo**



**Inserto de pasta**



**Inserto vaciado en su sitio**



**Inserto reforzado**



## **ESPACIADORES**

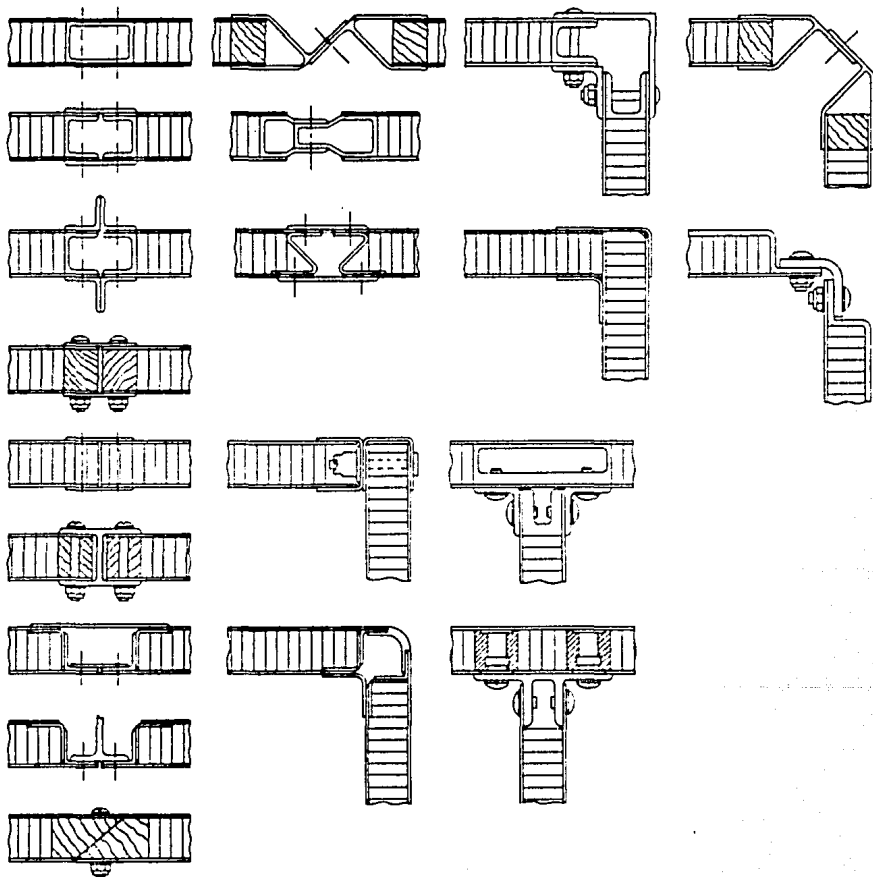
**Son piezas de aluminio en forma de carrete que sujetan firmemente las cubiertas del panel incrementando la resistencia al aplastamiento y a la vibración.**

**Los espaciadores tienen la ventaja de que se instalan después de fabricado el panel.**

**Los espaciadores se colocan con prensa, generalmente sin adhesivo, en perforaciones hechas previamente, normales a las cubiertas del panel y de diámetro igual al cilindro del carrete.**

**Las piezas que se sujetarán al panel se pasan a través del espaciador ó se atornillan directamente al espaciador, que en tal caso tiene una cuerda interior.**

# EJEMPLOS DE UNIONES DE PANELES



## APLICACIONES

La decisión de usar un panel estructural se puede basar en las condiciones de:

1. **Espesor**
2. **Claro**
3. **Peso / unidad de área**
4. **Aislamiento térmico**
5. **Aislamiento acústico**
6. **Resistencia al intemperismo**
7. **Resistencia al fuego**
8. **Efectos arquitectónicos especiales**
9. **Facilidad para modificar diseño**
10. **Tiempo de construcción**
11. **Facilidad para transportar y colocar elementos prefabricados.**
12. **Control de calidad**
13. **Costo**
14. **Mano de obra disponible**

## **VENTAJAS DEL PANEL SOBRE OTROS ELEMENTOS ESTRUCTURALES**

- 1.- Diseño más sencillo**
  
- 2.- Incorpora económicamente a la construcción materiales laminados metálicos, plásticos y lignocelulósicos**
  - a. Facilita la expresión arquitectónica moderna**
  
  - b. Permite obtener elementos estructurales con acabados de fábrica**
  
- 3.- Eficiente aprovechamiento de los materiales estructurales.**
  - a. Alta rigidez a la flexión / peso**
    - Claros grandes**
  
  - b. Bajo peso / unidad aérea**
    - Menor carga muerta**
    - Mayor facilidad para trasladar y colocar partes prefabricadas.**
  
  - c. Menor espesor**
    - Mayor relación área útil / área cubierta**

- 4.— Mayor seguridad porque la falla no es instantánea**
  
- 5.— Alta resistencia a la fatiga mecánica y sónica**
  
- 6.— Superficies lisas**
  
- 7.— Montaje muy sencillo**
  - a. Menor tiempo de construcción**
    - Menor costo del financiamiento durante la construcción.**
  - b. Utilización de mano de obra no especializada**
  - c. Utilización de herramientas comunes**
  - d. Utilización eficiente de la mano de obra**
  
- 8.— Recuperación íntegra**
  - a. Modificaciones sin ruido, ni polvo ni materiales de desecho.**

## **DESVENTAJAS DEL PANEL SOBRE OTROS ELEMENTOS ESTRUCTURALES.**

- 1.— Fuerte inversión en la planta para la fabricación de paneles.**
- 2.— Tolerancias dimensionales muy rígidas para los núcleos de los paneles.**
- 3.— Escrupulosa limpieza de las cubiertas**
- 4.— No pueden soportar temperaturas altas y prolongadas que afecten la estabilidad del adhesivo.**
- 5.— El control de calidad debe efectuarse en todas las fases del ensamble, pues los métodos de inspección final, no destructivos son limitados.**

## **ELEMENTOS PREFABRICADOS PARA CONJUNTOS HABITACIONALES**

Una solución adecuada consiste en utilizar paneles estructurales para techos y muros de carga combinados con paneles semi-estructurales ó no estructurales para muros divisorios, alacenas y puertas.

En la fabricación de paneles semi-estructurales y no estructurales es posible utilizar materiales locales.

Los muros-alacena y los muros para baños y cocinas con instalación hidráulica y sanitaria incluida fabricados en taller reducen notablemente costo, tiempo y problemas.

## **OTRAS APLICACIONES NO ESTRUCTURALES**

Las características de ligereza, rigidez y baja conducción térmica y acústica de los paneles, los hacen muy adecuados para

**Cancelerías**

**Deflectores**

**Aislamiento acústico**

**Aislamiento térmico**



## **BIBLIOGRAFIA**

### **RESISTENCIA DE MATERIALES**

S. Timoshenko

Espasa Calpe, 1949

### **TEORIA DE LAS ESTRUCTURAS**

S. Timoshenko .

D. H. Young

Acme Agency, 1948

### **ADHERENCIA Y ADHESIVOS**

R. Houwink

A.J. Staverman

C. Mylonas

N.A. de Bruyne

Aguilar, 1957

### **AIRCOMB TEST AND TECHNICAL DATA**

Engineering Staff

Douglas Aircomb Division, 1963

### **AIRCOMB DESIGN AND ANALYSIS**

Engineering Staff

Douglas Aircomb Division, 1963

**SANDWICH PANEL DESIGN CRITERIA**

**National Academy of Sciences**

**National Research Council**

**Publicación 798, 1960**

**STRUCTURAL FOAMS**

**National Academy of Sciences**

**National Research Council**

**Building Research Institute**

**Publicación 892, 1961**

**CURTAIN WALL CONSTRUCTION**

**Architectural Division**

**Porcelain Enamel Institute, Inc., 1957**

**SYMPOSIUM ON STRUCTURAL SANDWICH  
CONSTRUCTIONS**

**American Society for Testing Materials**

**ASTM Special Technical Publication No.118, 1951**

**SYMPOSIUM ON STRUCTURAL SANDWICH  
CONSTRUCTIONS**

**American Society for Testing Materials**

**ASTM Special Technical Publication No. 201, 1956**

**SYMPOSIUM ON DURABILITY AND WEATHERING  
OF STRUCTURAL SANDWICH CONSTRUCTIONS**

**ASTM Special Technical Publication No.270, 1959**