

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

FACULTAD DE INGENIERIA

T E S I S

*PROPUESTAS DE MEJORA EN MÁQUINAS PARA  
LA ELABORACIÓN DE MATERIAL COMPUESTO  
TIPO HONEYCOMB*

Q U E P R E S E N T A:

CARLOS FERNANDEZ LOPERENA

PARA OBTENER EL TÍTULO  
DE INGENIERO MECANICO

ASESOR DE TESIS: M.I. UBALDO MARQUEZ

MÉXICO, D.F.

2006



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 esta 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

- CAP. I.- MATERIALES PARA INGENIERÍA.  
I.1.- Metales  
I.2.- Cerámicos  
I.3.- Polímeros  
I.4.- Compuestos
- CAP. II.- ESTRUCTURAS TIPO EMPAREDADO.  
II.1.- Materiales para caras o recubrimiento.  
II.2.- Materiales de centro o relleno y propiedades.  
II.3.- Materiales de unión-adhesivos y propiedades.  
II.4.- Propiedades del centro honeycomb
- CAP. III.- DISEÑO DE UN EMPAREDADO.  
III.I.- Requerimientos de diseño.  
III.II.- Diseño de la forma y tamaño de las celdas.  
III.III.- Métodos de prueba.
- CAP. IV.- PROCESOS DE FABRICACIÓN.  
IV.I.- Manufactura de centros de papel honeycomb, por el método de perfilado y sus variantes.  
IV.II.- Método de expansión y sus variantes  
IV.III.- Maquinas de expansión.
- CAP. V.- PROPUESTAS DE MEJORA DE UNA MÁQUINA PARA ELABORAR HONEYCOMB.  
V.I.- Máquina de perforado  
V.2.- Máquina de punzonado.  
V.3.- Máquina de rayado.  
V.4.- Máquina de hilado.  
V.5.- Máquina de rayado doble.  
V.6.- Mecanismo de expansión.  
V.7.- Metodo alterno.

CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFÍA

# INTRODUCCIÓN

Cuando se diseña o se selecciona un material para una aplicación dada, deberán tomarse en consideración varios factores. El material debe tener las propiedades físicas y mecánicas requeridas, debe ser procesado o manufacturado a la forma deseada, y debe ser una solución económica al problema de diseño. Al cumplir con estas necesidades de diseño, el ingeniero podría enfrentarse a algunos compromisos, a fin de obtener un producto de buen desempeño y que al mismo tiempo sea rentable.

Por ejemplo, normalmente se calcula el costo del material con base en el costo por kilogramo de peso. En nuestro diseño y selección, deberemos tomar en consideración la **densidad** del material, es decir su peso por unidad de volumen (tabla A). Quizás el aluminio cueste más por kilogramo que el acero, pero sólo tiene una tercera parte del peso del acero. Aunque los componentes que se fabriquen a partir de aluminio tendrían que ser más gruesos, el componente de aluminio pudiera resultar menos costoso que el que se fabrique a partir del acero, en razón de la diferencia en peso.

En algunos casos, particularmente en aplicaciones aeroespaciales, el peso resulta crítico, ya que cualquier peso adicional incrementa el consumo de combustible, reduciendo el alcance del vehículo. Al utilizar materiales ligeros pero muy resistentes, los vehículos aeroespaciales pueden diseñarse para mejorar el uso del combustible. Muchos vehículos aeroespaciales modernos utilizan materiales compuestos en vez de aluminio. Estos compuestos, como los epóxicos reforzados con fibra de carbono son más costosos que las aleaciones tradicionales de aluminio; sin embargo, el ahorro en combustible obtenido en función de una más alta **relación resistencia- peso** del compuesto (tabla A) puede compensar el mayor costo inicial de la aeronave.

**TABLA A.-** Relación resistencia-peso de diversos materiales. (Tabla R. Askeland, pag 25).

Material	Resistencia (MPa)	Densidad ( $kg/m^3$ )	Relación resistencia-peso ( $\times 10^5 m$ )
Polietileno	6.89	0.83	0.216
Aluminio puro	44.82	2.72	0.43
$Al_2O_3$	206.84	3.16	1.7
Epóxicos	103.42	1.39	1.93
Aleación de acero con tratamiento térmico	1,654.74	7.76	5.53
Aleación de aluminio con tratamiento térmico	592.95	2.72	5.66
Compuesto carbono-carbono	413.68	1.80	5.95
Aleación de titanio con tratamiento térmico	1,172.11	4.44	6.85
Compuesto Kevlar-epóxico	448.16	1.39	8.40
Compuesto carbono epóxico	551.58	1.39	10.33

Hoy en día la importancia de encontrar nuevos materiales que cumplan con las grandes expectativas es cada vez más necesaria, por lo cual también tiene una relación directa en los procesos de fabricación, los cuales deben ser mejorados con un costo mínimo, sobre todo en los procesos de fabricación de materiales compuestos.

Tomando en cuenta esta necesidad realizamos esta Tesis, en la cual comenzamos con un acercamiento al mundo de los materiales indicando el lugar que ocupan los materiales compuestos tipo honeycomb de los cuales está basada este trabajo; posteriormente nos adentramos a conocer este tipo de estructuras, su diseño y procesos de fabricación para entrar al **objetivo** de este trabajo que son las propuestas de mejora en máquinas para la elaboración de materiales compuestos tipo HONEYCOMB.

**CAP I.- MATERIALES PARA  
INGENIERÍA.**

# **CAP. I.- MATERIALES PARA INGENIERÍA.**

## **I.- INTRODUCCIÓN**

Todos los ingenieros manejan cotidianamente los materiales. Estos se manufacturan y procesan para convertirlos en artículos diversos; con ellos se diseñan y construyen componentes o estructuras, se seleccionan y analizan sus fallas, o simplemente se preve un funcionamiento adecuado de los materiales.

A todos los ingenieros de manufactura les interesa mejorar las características del producto que se diseña o fabrica. Los ingenieros en electricidad y en electrónica requieren de circuitos integrados que funcionen adecuadamente, de interruptores que reaccionen de manera instantánea en las computadoras y de aislantes que soporten altos voltajes, aun en las condiciones más adversas. Los ingenieros civiles y los arquitectos desean construir estructuras sólidas y confiables que sean estéticas y resistan la corrosión. Los ingenieros petroleros y los químicos requieren barrenas de perforación o tuberías que resistan condiciones severas de abrasión y corrosión. Los ingenieros de automóviles buscan materiales de poco peso y a la vez resistentes. Los ingenieros aeroespaciales demandan materiales ligeros que se comporten adecuadamente, tanto a elevadas temperaturas como en el gélido vacío del espacio exterior. Los ingenieros metalúrgicos, así como los especialistas en cerámicas y polímeros, desean producir y conformar materiales que sean económicos y tengan propiedades cada vez mejores.

Aunque hay una enorme variedad de materiales para ingeniería, las propiedades mecánicas de cada uno pueden preverse y controlarse interpretando el enlace atómico, la estructura atómica y los mecanismos de endurecimiento.

## I.1.- CLASIFICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES.

Los materiales se clasifican, según su uso, en cuatro grupos: metales, cerámicas, polímeros y materiales compuestos.

### I.1.1.- Metales.

Los metales y las aleaciones, que incluyen al acero, aluminio, magnesio, zinc, hierro fundido, titanio, cobre, níquel y muchos otros, tienen como características generales una adecuada conductividad tanto térmica como eléctrica, relativamente alta resistencia mecánica, alta rigidez, ductilidad o conformabilidad, y resistencia al impacto. Son particularmente útiles en aplicaciones estructurales o de carga. Aunque ocasionalmente se utilizan en forma pura, se prefiere normalmente el empleo de sus combinaciones, denominadas *aleaciones*, para mejorar ciertas propiedades deseadas o permitir una mejor combinación de las mismas.

Si hay un material "característico" que asocia el público en general con la ingeniería es el *acero* estructural. Este versátil material de construcción tiene varias características (es decir, propiedades) que se consideran como *metálicas*. Es resistente y se puede amoldar a las formas necesarias. Su gran facilidad de deformación permanente (o *ductilidad*) es un factor importante que le permite deformarse poco frente a cargas súbitas y grandes. En el estado de California, Estados Unidos, mucha gente ha podido observar, durante sismos moderados, que los vidrios de las ventanas (relativamente *frágiles*) se rompen, mientras que sus marcos, de acero, siguen funcionando con normalidad. La superficie recién cortada en el acero tiene "lustre metálico" característico, y la varilla de acero comparte una característica fundamental con otros metales: es buena conductora de corriente eléctrica. Si bien el acero estructural es un ejemplo muy común de los metales para la tecnología, y si meditamos un poco recordaremos muchos más .

Es útil examinar el comportamiento metálico en el contexto de los elementos químicos que se conocen. La figura I.a, es un "retrato de familia" de los *elementos* químicos en la *tabla periódica*; los que son inherentemente metálicos. En verdad son familia numerosa. Los elementos sombreados en esa figura son las bases de las diversas *aleaciones* técnicas, incluyendo los hierros y aceros, que se basan en el hierro (Fe), las aleaciones de aluminio (Al), de magnesio (Mg), titanio (Ti), níquel (Ni), zinc (Zn) y de cobre (Cu). Estas últimas incluyen los latones (Cu-Zn) y los bronce (Cu-Sn).

1 IA	2 IIA												13 IIIA	14 IVA	15 VA	16 VIA	17 VIIA	18 0
H	Li												B	C	N	O	F	He
Na	Be	3 IIIB	4 IVB	5 VB	6 VIB	7 VIIB	8 VIIIB	9 VIIIB	10 VIIIB	11 IB	12 IIB	Al	Si	P	S	Cl	Ar	
K	Mg	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
Rb	Ca	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
Cs	Sr		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
Fr	Ba		Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt										
			La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
			Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	

Figura I.a.- Tabla periódica que muestra los elementos metálicos (sombreado)

Los metales y aleaciones se dividen en dos categorías: ferrosos y no ferrosos.

Las aleaciones ferrosas están basadas en el hierro como constituyente principal e incluyen aceros, aceros inoxidables y diversas clases de hierro fundido. En las aleaciones no ferrosas intervienen metales diferentes al hierro.

#### a) Aleaciones ferrosas.

Más del 90% del peso de los materiales metálicos que utiliza el hombre son aleaciones ferrosas. Estas representan una inmensa familia de materiales de ingeniería con amplio rango de microestructuras y sus correspondientes propiedades. La mayor parte de los diseños de ingeniería que requieren del soporte estructural de cargas o de transmisión de potencia, involucran aleaciones ferrosas. Desde el punto de vista práctico, estas aleaciones caen en dos categorías extensas que se basan en la cantidad de carbono presente en la composición de la aleación. Por lo regular, el **acero** contiene entre 0.05 y 2.0%

de peso de C. Los **hierros fundidos** por lo general contienen entre 2.0 y 4.5% de peso de C. Dentro de la categoría de los aceros, haremos una distinción si se usa o no una cantidad significativa de elementos aleantes diferentes al carbono. Una composición del 5% de peso total de adiciones distintas del carbono servirá como límite arbitrario entre los aceros de baja aleación y los de alta aleación. Estas adiciones de aleación se seleccionan con cuidado ya que invariablemente representan un notable incremento en el costo del material. Sólo se justifican con el mejoramiento esencial las propiedades tales como una mayor resistencia estructural o una mayor resistencia a la corrosión.

## b) Aleaciones no ferrosas.

Las aleaciones ferrosas, incluso los aceros inoxidables y las fundiciones utilizan tratamientos térmicos similares para controlar las microestructuras y las propiedades. Sin embargo la estructura y el comportamiento de las aleaciones no ferrosas tienen diferencias enormes. Las temperaturas de fusión, por ejemplo, van casi desde la temperatura ambiente para el galio hasta más de 3000°C para el tungsteno. Las resistencias mecánicas varían de los 6.9 MPa (1000psi) hasta más de los 1379 MPa (200,000psi). El aluminio, el magnesio y el berilio ("metales ligeros") tienen densidades muy bajas, en tanto que el plomo y el tungsteno tienen densidades excepcionalmente altas.

En muchas aplicaciones el peso es un factor crítico. Para relacionar la resistencia del material con su peso, se ha establecido una resistencia mecánica específica o relación resistencia peso:

$$\text{Resistencia mecánica específica} = \frac{\text{Resistencia mecánica}}{\text{Densidad}}$$

La tabla I.B compara la resistencia mecánica específica de algunas aleaciones de alta resistencia mecánica.

Otro factor en el diseño con metales no ferrosos es su costo, que también varía de manera considerable. La tabla I.B reporta el precio aproximado de los metales en 1992. Se deberá notar, sin embargo, que el precio del metal es solamente una pequeña parte del costo de un componente. Su fabricación y terminado, sin mencionar la comercialización a menudo contribuye mucho más al costo total de una pieza.

**TABLA I.B.-** Resistencia específica y costo de aleaciones no ferrosas.

Metal	Densidad ( $g/cm^3$ )	Resistencia a la tracción ( $MPa$ )	Resistencia específica ( $X10^4m$ )	Costo por kilogramo (\$)
Aluminio	2.70	585	2.19	0.60
Berilio	1.85	387.6	2.08	660
Cobre	8.93	1057.08	1.20	2.42
Plomo	11.36	70.47	0.05	0.704
Magnesio	1.74	387.6	2.21	3.08
Níquel	8.90	1268.5	1.42	9.02
Titanio	4.51	1127.55	2.49	12.1
Tungsteno	19.25	1057.08	0.56	22
Zinc	7.13	528.54	0.73	1.21
Hierro	7.87	1409.44	1.77	0.22

### **I.1.2.- Cerámicos.**

Los materiales cerámicos se encuentran unidos por enlaces iónicos o covalentes, son soluciones complejas que contienen tanto elementos metálicos como no metálicos. Los materiales de cerámica, como los ladrillos, el vidrio, la loza, los aislantes y los abrasivos, tienen escasa conductividad tanto eléctrica como térmica, y aunque pueden tener buena resistencia y dureza, son deficientes en ductilidad, conformabilidad y resistencia al impacto. Por lo anterior son menos usados que los metales en aplicaciones estructurales a excepción del concreto. No obstante, presentan en su mayoría una excelente resistencia a las altas temperaturas y a ciertas condiciones de corrosión. Muchos de ellos tienen propiedades ópticas, eléctricas y térmicas excepcionales. Las losetas que protegen un transbordador espacial son de sílice, un material cerámico. Comúnmente los cerámicos son duros y frágiles, con alto punto de fusión y baja conductividad eléctrica y térmica, adecuadas estabilidades química y térmica, y altas resistencias a la compresión.

El aluminio (Al), es un metal común, pero el *óxido* de aluminio, ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) es característico de la familia de las cerámicas. Como *óxido* tiene dos ventajas principales con respecto al Al metálico. La primera es que el  $\text{Al}_2\text{O}_3$  es químicamente estable en una gran variedad de ambientes enérgicos, en los cuales se "oxidaría" el Al. De hecho, un producto normal de reacción en la degradación química del aluminio es el *óxido*, con más estabilidad química. La segunda ventaja principal es que el  $\text{Al}_2\text{O}_3$  cerámico tiene un punto de fusión bastante mayor, ( $2020^\circ\text{C}$ ), que el Al metálico, ( $660^\circ\text{C}$ ). Esto hace que el  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sea un *refractario* bastante común; esto es, un material resistente a las altas temperaturas, que se usa mucho en construcción de hornos. Las mejores propiedades químicas y de resistencia a las altas temperaturas de la cerámica de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  hacen surgir la duda: "¿Por qué no se podría usar el  $\text{Al}_2\text{O}_3$  en ciertas aplicaciones, por ejemplo, en motores de automóviles, donde se utiliza el aluminio?" La respuesta reside en la propiedad más desfavorable de las cerámicas: su fragilidad. Mientras que el aluminio y otros metales tienen la propiedad de ser dúctiles, lo cual les permite soportar grandes cargas de impacto sin fracturarse o romperse, el *óxido* de aluminio y otros materiales cerámicos no la tienen. Esto los elimina de la selección cuando se trata de muchas aplicaciones estructurales. Los adelantos recientes en la tecnología de las cerámicas aumentan continuamente el uso de éstas en estructuras. No eliminan su fragilidad inherente, sino aumentan su resistencia a valores lo suficiente elevados en forma característica, a más de  $700\text{ MPa}$  ( $7200\text{ Kg/cm}^2$ ), aumentando su resistencia a la fractura.

El *óxido* de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), es característico de las cerámicas tradicionales, de las cuales otros buenos ejemplos son el *óxido* de magnesio ( $\text{MgO}$ ), y la *sílice* ( $\text{SiO}_2$ ). Además, la  $\text{SiO}_2$  es base en la familia, grande y compleja, de los *silicatos*. La mayor parte de las cerámicas de importancia comercial son compuestos químicos de al menos un elemento metálico (figura I.A) y uno de los 5 elementos no *metálicos*, C, N, O, P o S. La figura I.B, muestra la enorme variedad de materiales cerámicos que pueden producirse por combinaciones de metales (en zona clara) con los 5 no metales clave (en oscuro). Téngase en cuenta que muchas cerámicas comerciales comprenden compuestos y soluciones de mucho más que dos elementos, al igual que las aleaciones metálicas comerciales están formadas por muchos elementos.

1 IA	2 IIA												13 IIIA	14 IVA	15 VA	16 VIA	17 VIIA	18 0
H	He												B	C	N	O	F	Ne
Li	Be												Al	Si	P	S	Cl	Ar
Na	Mg	3 IIIB	4 IVB	5 VB	6 VIB	7 VIIB	8 VIIIB	9 VIIIB	10 VIIIB	11 IIB	12 IIB							
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
Fr	Ra		Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt										
			La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
			Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	

Figura I.B.- Elementos que se indican en varios tonos de gris: las cerámicas se forman mediante una combinación entre uno o más elementos metálicos, (sombreado claro), con uno o más elementos no metálicos, (sombreado oscuro). Nótese que los elementos silicio (Si) y germanio (Ge) aparecen con los metales en esta figura, pero no estaban así en la figura 1.2.1.a. Esto se debe a que, en forma elemental, el Si y el Ge se comportan como semiconductores. El estaño elemental (Sn) puede ser tanto metal como semiconductor, dependiendo de su estructura cristalina.

Los metales y algunas cerámicas tienen una característica estructural semejante a escala atómica: ser *cristalinos*, lo cual quiere decir que los átomos que los forman están arreglados y unidos en una distribución regular y repetitiva. Una de las diferencias entre los materiales de tipo metálico y de tipo cerámico es que, mediante técnicas bastante sencillas de procesamiento, muchas cerámicas pueden fabricarse en forma *no cristalina*; esto es, sus átomos están arreglados en conjuntos irregulares y aleatorios. *Vidrio\** es el nombre general de los sólidos no cristalinos cuyas composiciones son comparables a las de cerámicas cristalinas. La mayor parte de los vidrios comunes son silicatos; el vidrio ordinario de ventanas está formado aproximadamente por 72% en peso de sílice ( $\text{SiO}_2$ ), y el resto es principalmente óxido de sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) y óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ). Los vidrios tienen en común, con las cerámicas Cristalinas, la propiedad de fragilidad. Son materiales técnicos importantes por otras de sus propiedades, por ejemplo, su capacidad de transmitir luz visible (así como la radiación ultravioleta e infrarroja, al igual que por su inercia química).

Un desarrollo relativamente reciente en el campo de los materiales es una tercera categoría, la de las *vidrio cerámicas*, o vitrocerámicas. Algunas formulaciones de vidrio, por ejemplo, los aluminosilicatos de litio, se pueden *desvitrificar* totalmente, es decir, pueden transformarse del estado vítreo al estado cristalino, mediante un tratamiento térmico adecuado. Si se conforma el producto mientras está en su forma vítrea, pueden obtenerse formas complicadas. La cristalización siguiente produce una estructura microscópica de alta calidad (grano fino y sin porosidad). Con ella se obtiene un producto de resistencia mecánica mayor que la de muchas cerámicas cristalinas tradicionales. Una ventaja adicional es que los compuestos de aluminosilicato de litio tienden a tener bajos coeficientes térmicos de expansión, lo que los hace resistentes a fractura por cambios rápidos de temperatura. Esta es una ventaja importante en aplicaciones como utensilios de cocina.

Los cerámicos los podemos dividir en tres categorías principales. Las **cerámicas cristalinas**, incluyen los silicatos tradicionales y los muchos compuestos de óxidos y sin óxido ampliamente usados tanto en la tecnología tradicional como en la avanzada. Los **vidrios** son sólidos no cristalinos con composición comparable a las de las cerámicas cristalinas. La ausencia de cristalinidad, resultante de las técnicas de procesamiento específicas, da un conjunto único de propiedades mecánicas y ópticas. Químicamente, los vidrios se subdividen convenientemente en silicatos y no silicatos. Las **cerámicas de vidrio**, correspondientes a la tercera categoría, son otro tipo de cerámicas cristalinas que inicialmente se forman como vidrios y posteriormente se cristalizan de manera cuidadosa y controlada. Composiciones muy específicas conducen por sí mismas a esta técnica, el sistema  $\text{Li}_2\text{O}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  es el ejemplo comercial más importante.

La fractura por fragilidad y la cedencia juegan papeles importantes en las aplicaciones estructurales de cerámica. De manera análoga a nuestra explicación de la fatiga en los metales, las cerámicas y los vidrios pueden demostrar una pérdida de resistencia con el tiempo pero sin la aplicación de esfuerzos cíclicos. Esta "fatiga" estática es una función sensible del ambiente. La fragilidad inherente de las cerámicas combinada con sus aplicaciones comunes a altas temperaturas hacen del "choque térmico" (es decir, la fractura debida a un enfriamiento repentino) de interés primordial.

El uso difundido de vidrios y ciertas cerámicas cristalinas es debido a su cualidad para transmitir luz, *propiedades ópticas*. El índice de refracción es una propiedad fundamental con implicaciones acerca de la naturaleza en la reflexión de la luz en la superficie del material y la transmisión a través del cuerpo. La transparencia de una determinada cerámica o vidrio está limitada por la naturaleza de cualquier microestructura de segunda fase (la porosidad o una fase sólida con índice de refracción diferente del de la matriz). La coloración de cerámicas y vidrios para transmisión de luz resulta de la absorción de ciertas longitudes de onda de luz por especies de iones como el  $\text{Fe}^{3+}$  y el  $\text{Co}^{2+}$ .

### **I.2.3.- Polímeros.**

En éstos se incluyen el caucho (o hule), los plásticos y muchos tipos de adhesivos. Se producen creando grandes estructuras moleculares a partir de moléculas orgánicas obtenidas del petróleo o productos agrícolas, en un proceso conocido como polimerización, conforme se aumenta el tamaño del polímero, se incrementa el punto de fusión o de reblandecimiento y el polímero se hace más resistente y rígido. Los polímeros son moléculas orgánicas gigantes, que tienen pesos moleculares de 10,000 a 1,000,000 g/g mol, además baja conductividad eléctrica y térmica, escasa resistencia mecánica y no se recomiendan para aplicaciones en temperaturas elevadas. Algunos polímeros (los termoplásticos) presentan excelente ductilidad, conformabilidad y resistencia al impacto, mientras otros (los termoestables) tienen las propiedades opuestas. Los polímeros son ligeros y con frecuencia cuentan con excelente resistencia a la corrosión, se emplean para juguetes, artículos para el hogar, artículos estructurales y decorativos, recubrimientos, pinturas, adhesivos, neumáticos, empaques y muchas otras.

Quizá no haya una clase de materiales que sea más característica del impacto de la tecnología moderna sobre la vida cotidiana que los *polímeros*. Estos materiales artificiales forman una rama especial de la química orgánica. Podemos recordar con facilidad ejemplos de productos poliméricos poco costosos y funcionales. Un nombre común y alterativo para esta categoría es el de *plásticos*, que describe la gran conformabilidad de muchos polímeros durante su fabricación. El "mero" o monómero en un plástico es una molécula única de hidrocarburo, por ejemplo, una molécula de etileno, ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ). Los polímeros son moléculas de cadena larga formada por muchos monómeros unidos entre sí. El



#### I.1.4.- Materiales compuestos.

Los compuestos (o compósitos) están constituidos por dos o más materiales que generan propiedades no obtenibles mediante uno solo; ejemplos típicos aunque burdos, son el concreto, la madera contrachapada ("triplay") y la fibra de vidrio. Los compuestos pueden ser metal-metal, metal-cerámica, metal-polímero, cerámica-polímero, cerámica-cerámica, o polímero-polímero. Con los compuestos se fabrican materiales ligeros, resistentes, dúctiles, con resistencia a las altas temperaturas que no pueden obtenerse de otro modo, o bien se elaboran herramientas de corte muy resistentes al impacto que de otra manera serían quebradizas por ejemplo las herramientas de corte de carburo cementado, el titanio reforzado con fibras de carburo de silicio y el acero esmaltado.

No hay necesidad de indicar una región de la tabla periódica que se caracteriza de los materiales compuestos, puesto que abarcan virtualmente toda la tabla, excepto los gases nobles (la columna 0).

Los materiales compuestos, son aún más difíciles de categorizar debido a los muchos tipos y variados usos de los materiales, pero los podemos organizar en tres categorías , -- **con partículas, con fibras y laminares** – dependiendo de las formas de los materiales de reforzamiento. El concreto mezcla de cemento y grava, es un compuesto particulado; la fibra de vidrio, que consiste de fibras de vidrio en un polímero, es un compuesto reforzado por fibras, y la madera terciada o triplay , que tiene capas alternadas de madera chapada con veta, es un compuesto laminar. El comportamiento de algunos de los compuestos puede explicarse en términos del endurecimiento por dispersión. Sin embargo, muchos compuestos son diseñados para proporcionar características especiales que van más allá de los métodos convencionales para el control de la relación estructura-propiedades.

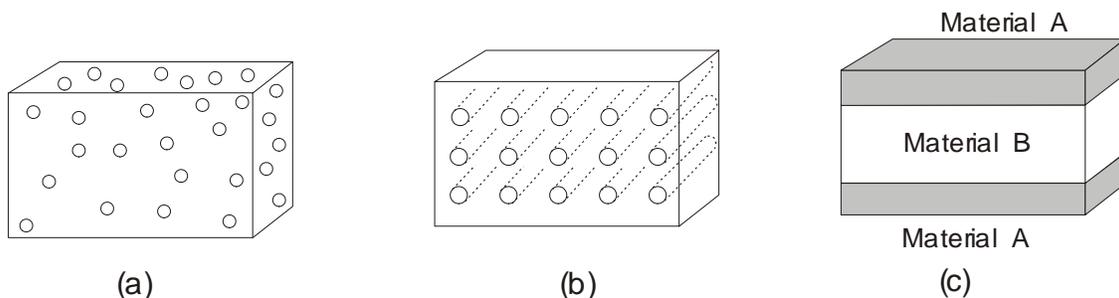


Fig 1.D.- Comparación de los tres tipos de materiales compuestos. (a) Con partículas, (b) reforzado con fibras, y (c) laminar.

### **a) Materiales compuestos reforzados con partículas**

En los compuestos reforzados con partículas, las partículas de un material duro y frágil dispersas de una manera discreta y uniforme se rodean por una matriz más blanda y dúctil. De hecho, la estructura hace recordar la de muchas aleaciones metálicas de dos fases endurecidas por dispersión. Sin embargo, en los compuestos no se utiliza una transformación de fase para introducir las partículas dispersas, sino un proceso mecánico.

Se pueden subdividir los materiales compuestos por partículas en dos categorías generales, basadas en el tamaño y la sustancia de las partículas que influyen en las propiedades del compuesto. Estas dos categorías incluyen: (a) los compuestos endurecidos por dispersión y (b) los compuestos con partículas propiamente dichos.

### **b) Materiales reforzados con fibras.**

Estos compuestos mejoran la resistencia al esfuerzo, la resistencia a la fatiga, la rigidez y la relación resistencia-peso, a través de la introducción de fibras fuertes, rígidas y frágiles dentro de una matriz más blanda y dúctil. El material de la matriz transmite la fuerza a las fibras y proporciona ductilidad y tenacidad, mientras que las fibras soportan la mayor parte de la fuerza aplicada.

Se emplea una enorme variedad de materiales reforzados. Durante siglos, la paja ha sido utilizada para darle resistencia a los adobes. En las estructuras de concreto se introducen como refuerzo varillas de acero. Las fibras vítreas en una matriz polimérica producen la fibra de vidrio para aplicaciones de transporte y aeroespaciales. Las fibras hechas de boro, grafito y polímeros proporcionan un refuerzo excepcional. Aun los diminutos monocristales de materiales cerámicos llamados whiskers, bigotes o triquitas han sido desarrollados para este objeto.

Los materiales reforzantes se ordenan también en una variedad de orientaciones (Figura I.E). Las fibras vítreas cortas orientadas aleatoriamente se encuentran presentes en la fibra de vidrio. Se pueden usar arreglos unidireccionales de fibras continuas para producir deliberadamente propiedades anisotrópicas. Las fibras pueden colocarse en forma de telas o ser producidas en forma de cintas. Se pueden cambiar de orientación en las capas alternadas de cintas.

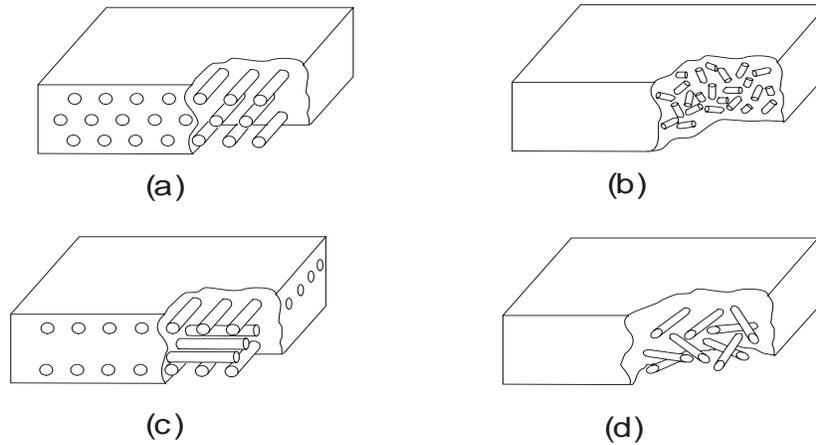


Fig. I.E.- Varias morfologías de compuestos reforzados con fibras. (a) Fibras continuas unidireccionales, (b) fibras discontinuas orientadas al azar, (c) fibras ortogonales, y (d) fibras en capas múltiples.

### c) Materiales compuestos laminares.

Los compuestos laminares incluyen recubrimientos muy delgados, superficies protectoras más gruesas, revestimientos, elementos bimetálicos o bimetales, laminados y muchos otros. Muchos compuestos laminares son diseñados para mejorar la resistencia a la corrosión mientras se mantiene un bajo costo, alta resistencia o bajo peso. Otras aplicaciones importantes incluyen una superior resistencia al desgaste o abrasión, una mejor apariencia y características poco usuales de expansión térmica. Para producir los compuestos se usa una gran variedad de procesos de manufactura, como el laminado, la soldadura por explosión, la extrusión, la compresión y la soldadura.

Algunas propiedades de los materiales compuestos pueden ser determinadas a partir de la **Regla de las mezclas**. En los compuestos reforzados por partículas solo se puede determinar la densidad. Tanto los compuestos reforzados con fibras y los compuestos laminares, se puede determinar su densidad, conductividad térmica y eléctrica, y el módulo de elasticidad con mucha precisión.

$$\text{Densidad} = \rho_c = \sum f_i \rho_i$$

$$\text{Conductividad eléctrica} = \sigma_c = \sum f_i \sigma_i$$

$$\text{Conductividad térmica} = k_c = \sum f_i k_i$$

$$\text{Módulo de elasticidad} = E_c = \sum f_i E_i$$

Donde  $\rho_i$ ,  $\sigma_i$ ,  $k_i$ ,  $E_i$  y  $f_i$ , son la densidad, conductividad eléctrica, conductividad térmica, módulo de elasticidad y la fracción volumétrica de cada constituyente.

Como podemos observar en este capítulo, existen tres familias que conforman a los materiales compuestos, **Metales, Polímeros y Cerámicos** teniendo cada una gran diversidad de materiales con los cuales podemos tener una gran cantidad de combinaciones para obtener **Materiales Compuestos**.

Dentro de la categoría de materiales compuestos se encuentran los materiales de tipo emparedado de los cuales comprenden las estructuras de **Panal o Honeycomb**, las cuales son de gran interés para este trabajo basándose en los procesos y máquinas para la elaboración de este tipo de material

## **CAP II.- ESTRUCTURAS TIPO EMPAREDADO.**

# CAP II.- ESTRUCTURAS DE MATERIALES COMPUESTOS TIPO EMPAREDADO

## II.- INTRODUCCIÓN

Los materiales en **emparedado** tienen capas delgadas de material de recubrimiento unidas a algún material ligero de relleno, como una espuma de polímero. Ni el relleno ni el material de recubrimiento son resistentes o rígidos, pero el compuesto tiene ambas propiedades. Un ejemplo familiar es el cartón *corrugado*. Un núcleo corrugado de papel se une por ambos lados a papel plano y grueso. Ni el núcleo corrugado ni el papel de recubrimiento es rígido, pero su combinación sí lo es.

Otro ejemplo importante es la estructura en panal o Honeycomb que se utiliza en aplicaciones para aeronaves. Se produce un **panal** al unir una tira delgada de aluminio en puntos específicos. A continuación el material para el panal se expande para producir un panel celular de muy baja densidad, que por sí mismo es inestable. Sin embargo, cuando a ambos lados del panal se le adhieren hojas de aluminio, se obtiene un emparedado muy rígido, fuerte y excepcionalmente ligero, con una densidad tan baja como  $0.04 \text{ g/cm}^3$

Las celdas del panal pueden tener una diversidad de formas, hexagonales, cuadradas, rectangulares o senoidales, y se pueden fabricar de aluminio, fibra de vidrio, papel, polímeros de aramida y otros materiales. Las celdas del panal pueden estar rellenas de espuma o fibra de vidrio, para proporcionar una excelente absorción de sonidos y vibraciones.

Las estructuras de emparedado es una de las primeras de estructuras compuestas que tienen gran aceptación y uso. Virtualmente todas las aerolíneas comerciales y helicópteros, y casi todos los aviones militares y naves espaciales hacen extensivo el uso de materiales de este tipo. La efectividad de este material se muestra en la fig.II.a.

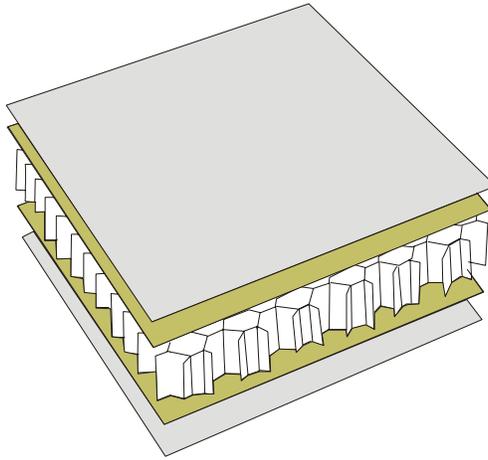


Figura II.a. Los elementos de una estructura emparedada son: 1) dos caras delgadas, rígidas, resistentes; 2) un centro grueso de baja densidad; y 3) un adhesivo de fijación el cuál fuerza al centro y caras a actuar como una estructura continua. Las caras actúan transmitiendo y soportando cargas (teniendo una cara en tensión y otra en compresión). El centro continúa la transmisión de las cargas y soporta los esfuerzos cortantes y soporte.

Además de la aviación y de vehículos espaciales, es comúnmente utilizado en la manufactura de contenedores de carga, refugios móviles, interiores de barcos, pequeños botes y yates, producción de partes automotrices, esquís para nieve, despliegues de cajas materiales de construcción de residencias, división de interiores, puertas, gabinetes, y un gran número de artículos.

Aunque la idea del diseño de emparedado para producir miembros ligeros de transportación de carga fue en 1820, no fue empleado hasta 110 años más tarde. Quien comenzó esta repentina aceptación fue la exitosa producción comercial de adhesivos, comenzando en Inglaterra y Estados Unidos en 1930. Este año fue resultado de del desarrollo de rubberphenolics y vinyl-phenolics. Materiales como cycleweld, plycosite y redux adhieren y pegan bien tanto a maderas como metales, teniendo altas y predecibles resistencias, comenzando una revolución en la tecnología.

Algunos desarrollos se han dado en pocos años. Ellos incluyen el mejoramiento de los métodos de laminación de metales de bajo peso, alta resistencia, rigidez para los materiales de centro o relleno, utilización de buenos adhesivos, fibra de vidrio, alta resistencia de resinas, etc.

## **ESTRUCTURA**

Una estructura de tipo emparedado consiste de tres elementos:

- 1.- Un par de delgadas, fuertes capas de recubrimiento (caras).
- 2.- Un centro o relleno grueso ligero de baja densidad que separa estas caras y transmite cargas de una a otra.
- 3.- Un adhesivo que fuerza al centro y las caras a actuar como una estructura continua, que es capaz de transmitir fuerzas.

### **II.I.- MATERIALES EMPLEADOS.**

#### **II.I.1.- Materiales para caras o recubrimiento.**

La primera función de las caras es de soportar los esfuerzos de torsión requeridos, transmitir las cargas, esfuerzos de tensión, compresión y resistencia. En el campo aerospacial, las capas comúnmente seleccionadas son resinas impregnadas, fibra de vidrio ("prepreg"), grafito prepreg (en cintas unidireccionales o entretejidas), aleaciones de aluminio 2024 o 7075, titanio o acero. Incluso el mas económico de todos estos representa un sustancial costo, el trabajo del consumidor es escoger entre ellos cuidadosamente valores ingenieriles, tiempo de vida, etc.

Al escoger materiales de las caras así como el centro, adhesivos y otros materiales para una aplicación, es prudente examinar las propiedades menos obvias del material, como dureza y fragilidad, modo de fractura, durabilidad y resistencia, compatibilidad con fijadores o adhesivos, y otros atributos tales que pueden afectar la utilidad o éxito del producto final, incluso aunque no este directamente involucrado en el análisis de esfuerzos y el ahorro de peso. Una comprensión de estos requerimientos ha sido el resultado del cambio de aluminio a fibra de vidrio y de fibra de vidrio a armazones con corazón (honey comb) para la mayoría de las cabinas de aviones y los tableros. Este entendimiento es también la razón del uso de compuestos de grafito entretejido como cara de la superficie de la armazón de las estructuras emparedado de varios aviones de transporte Boeing en el inicio de los 80's. La Tabla II.a lista las propiedades mecánicas de varios materiales normalmente utilizados para las caras o superficies de la estructura.

TABLA II.a.- Propiedades mecánicas de varios materiales utilizados para las caras. (Composites Handbook)

Material de caras o superficies	Resistencia <i>MPa</i>	Módulo de Elasticidad <i>MPa</i>	$\lambda_{\delta}$ ( $1-\mu^2$ )	Peso de 1mm espesor en $1m^2$	Comentarios
Aluminio:					
2024-T3	800	$160 \times 10^3$	0.89	2.69	Buena resistencia, costo moderado.
5052-H34	416	$160 \times 10^3$	0.89	2.69	Costo moderado, resistente a la corrosión
5061-T6	560	$160 \times 10^3$	0.89	2.69	Manejable
7075-T6	1169	$160 \times 10^3$	0.89	2.69	Altos esfuerzos
Acero Templado					
Aceros	800	$480 \times 10^3$	0.91	7.68	Bajo costo, alto peso
316	961	$480 \times 10^3$	0.94	7.68	Resist. a la corrosión
17-7	3200	$480 \times 10^3$	0.94	7.68	Altos esfuerzos
Titanio:					
Ti-75A templado	1280	$240 \times 10^3$	0.94	4.52	Resist. a la corrosión
6ª 1-4V trat. térmico	2290	$269 \times 10^3$	0.94	4.42	Alto costo
Grafito Entretejido	1280	$160 \times 10^3$	0.99	1.54	Alto esfuerzo y costo
Grafito Unidireccional	3500	$320 \times 10^3$	0.99	1.54	Altos Módulos
Fibra de Vidrio mat/PE	224	$14.7 \times 10^3$	0.98	1.35	
Entretejida /PE	608	$29.6 \times 10^3$	0.98	1.35	
Fibra de Vidrio Prepreg:					
Epoxy	1009	$56 \times 10^3$	0.98	1.83	Baja temp. de curación
Epoxy	990	$56 \times 10^3$	0.98	1.69	Resist. al calor
Phenolic	769	$56 \times 10^3$	0.98	1.81	Alto
Poliéster	769	$56 \times 10^3$	0.98	1.92	Bajo
Polamida	961	$56 \times 10^3$	0.98	1.83	Alta resist. a la Temp.
Kevlar epoxy prepreg	961/448	$70 \times 10^3$	0.99	1.35	Muy duro.
Triplay					
Abeto Duglas grado ext.	42	$29 \times 10^3$	0.99	0.58	
Pino del Sur E.U.	42	$29 \times 10^3$	0.99	0.58	
Laguán	36	$29 \times 10^3$	0.99	0.38	
Conglomerado	57	$10 \times 10^3$	0.99	1.12	
Tabla de yeso	1.9	$4.8 \times 10^3$	0.98	0.80	

La Resistencia es tanto en compresión como en tensión, de cualquier forma, el valor señalado es el más pequeño.

Donde  $\lambda_{\delta}$  es necesario para cálculos posteriores de análisis estructural; obtenido de  $1-\mu^2$  la relación de Poisson al cuadrado.

Características de las probetas

Espesor actual	Espesor efectivo	Peso $Kg/m^2$
6mm	4mm	3.9
10mm	4mm	5.37
13mm	7mm	2.32

## **II.1.2.- Materiales de centro o relleno.**

La función primaria de un centro en estructuras de tipo emparedado es la de estabilizar las caras y soportar la mayoría de las cargas a través de su espesor. Para realizar este trabajo eficazmente, el centro debe ser lo mas rígido y ligero como sea posible, y debe entregar sus propiedades uniformemente dependiendo de su medio (pej. la alta humedad) en la cual la parte final es desarrollada.

### **Tipos de materiales de Centro:**

#### ***Madera***

Varios materiales son utilizados como centros de estructura tipo emparedado. El más viejo de éstos es la madera que se usa en muchas aplicaciones como centro para las puertas, divisiones ("suplementos de construcción"), y en muchos otros artículos. También se usa en la mayoría de los esquís de nieve la madera balsa que es muy ligera, aunque la tendencia es hacia los centros de estructura honeycomb, centros de espuma, o de plástico. La madera balsa de grano ha tenido gran aceptación en cascos de barco de longitudes de 1.52m (5ft) o más y todavía se usa para el reemplazo de suelo de muchos viejos y nuevos aviones. La ventaja tradicional del bajo costo de la madera se ha ido acabando progresivamente en los 70's, y muchos usuarios informan dificultad en el abastecimiento, incluso precios más altos que la espuma, y a veces aproximándose al del honeycomb. Aun así, la facilidad de uso y la excelente durabilidad del producto final han llevado a incrementar el uso, particularmente con la selección cuidadosa de la madera tipo balsa de grano-extremo, en aplicaciones como cascos de barco, grandes tanques, y paletas aerotransportadas y contenedores. Este gran uso también es incitado por su excelente fuerza de compresión y propiedades cuando se comparó con todos menos la estructura tipo honeycomb que son más caras. Las propiedades de tres densidades de madera de tipo balsa normalmente usadas están listadas en la Tabla II.b.

TABLA II.b.- Propiedades mecánicas de la madera tipo balsa, cuando se utiliza como centro.

DENSIDAD			(6 lb/ft <sup>3</sup> )	96 kg/m <sup>3</sup>	(11 lb/ft <sup>3</sup> )	176 kg/m <sup>3</sup>	(15.5 lb/ft <sup>3</sup> )	248 kg/m <sup>3</sup>
			psi	MPa	psi	MPa	psi	MPa
Valores a Cortante	Resistencia de extremo de grano	Típico superior	500	3.45	1450	10.0	2310	15.9
		Típico inferior	750	5.17	1910	13.2	2950	20.3
	Módulo de extremo de grano	Típico	330,000	2275	768,000	5295	1,169,000	8025
	Resistencia de grano liso	Típico superior	84	0.58	144	0.993	198	1.36
		Típico inferior	50	0.34	100	0.689	145	1.0
	Módulo de grano liso	Típico superior	16,000	110	37,000	255	55,000	379
Típico inferior		5,100	35.1	13,000	89.6	19,900	137	
Valores a Tensión	Resistencia de extremo de grano	Típico superior	1375	9.48	3050	21.0	4,525	31.2
	Resistencia de grano liso	Típico superior	112	0.77	170	1.17	223	1.54
		Típico inferior	72	0.49	118	0.814	156	1.07
	Valores a Compresión	Esfuerzo	Típico superior	180	1.24	360	2.48	522
Típico inferior			158	1.09	298	2.03	425	2.93
Módulos		Típico	16,000	110	37,000	255	55,000	379

### **Espuma.**

El uso de espuma como un centro estructural ha sido, y es ahora, de gran utilización. Los recientes desarrollos en la tecnología de inyección de espuma han aumentado su uso grandemente. El más novedoso de éstos es el uso de un dado de fría-cavidad en el que la espuma es inyectada y moldeada en un solo paso de la producción. Un cuidadoso ajuste de la reacción de curación de la espuma y el efecto calor-fregadero del molde se produce en parte con las caras que simplemente son de densidad más alta que la espuma que constituye el centro. La alta productividad y el modesto costo de este esquema han resultado muchas

aplicaciones en los campos automotrices e industriales. Otro crecimiento rápido del material está en los centros para esquís de nieve y raquetas de tenis de fibra de vidrio, en el cual un armazón del material para las caras es puesto en una cavidad cerrada y la espuma es inyectada para formar tanto el adhesivo como el centro pegándose a las paredes de fibra de vidrio. El resultado de este ahorro de elaboración ha producido rápida aceptación del proceso y la reciente construcción de muchas nuevas fábricas en Europa y los Estados Unidos. Las espumas también proporcionan propiedades especiales como aislamiento o transparencia del radar.

Debido al bajo costo de las espumas de poliestireno se utilizan principalmente en otras aplicaciones diferentes de estructuras de tipo emparedado, su utilización en partes estructurales para los vehículos y edificios refrigerados han sido tomados grandemente por encima de los urethanos. Las espumas de cloruro del polyvinyl (PVC) que hicieron un impacto en la industria de la aviación como corazón de los pisos de los aviones, también han sido remplazadas por armazones tipo honey-comb siendo más eficientes respecto a su densidad.

El sistema de producción de estructuras tipo emparedado "foam-in-place" ha sido utilizado por más de 25 años debido a su concepto simple. Sin embargo, los usuarios de este sistema siempre han sido plagados por un problema continuo en la producción de propiedades uniformes para las siguientes mezclas y vincular las fuerzas a las caras de metal o fibra de vidrio. El uso de una sistemática inspección, automatización del mezclado, equipo, y exámenes en el caso de partes o estructuras críticas, producido íntegramente con la parte básica ha mantenido todos problemas bajo control. En la Tabla II.c. no se lista el esfuerzo cortante de muchas espumas, sin embargo estos valores son necesarios para el diseño. Esta propiedad, incluso si estuviera listada, debe ser determinada por los actuales materiales y las condiciones de uso para que sean consideradas fiables. Cuándo un valor de esfuerzo cortante no está disponible, este puede ser estimado cerca de 0.7 veces el valor de esfuerzo de compresión mostrado.



## **Material de centro HONEYCOMB**

### Factores Generales.

El uso común de honeycomb incluye productos hechos sin cubierta o sin protección, de resinas impregnadas, papel kraft, varias aleaciones de aluminio, papel aramid, y vidrio reforzado por plástico en diversos tejidos y sistemas de resinas. Titanio, acero, y muchos otros son utilizados en menores cantidades.

En el caso de honeycomb de papel aramid, la inherente dureza y resistencia del material produce centros de  $16-48 \text{ kg/m}^3$  ( $1-3 \text{ lb/ft}^3$ ), una excelente opción para interiores de cabinas y techos, incluso con capas fibra de vidrio de espesores menores de 0.254mm (0.010in).

Las propiedades físicas y mecánicas del centro honeycomb son influenciadas fuertemente por las propiedades de los *materiales* de los que esta manufacturado. En la figura II.a se muestran algunas diferencias obvias respecto a la conductividad térmica. Sin embargo, varias propiedades significantes del honeycomb se deben a la geometría, tamaño, densidad, espesor del centro del panel mas que los materiales básicos, por lo que se debe tener en cuenta esta separación que haremos mención mas adelante.

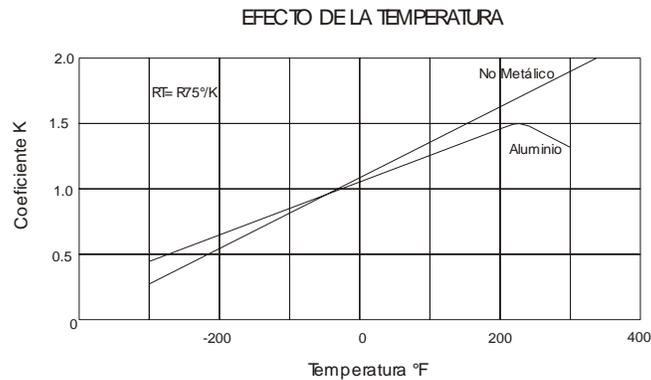
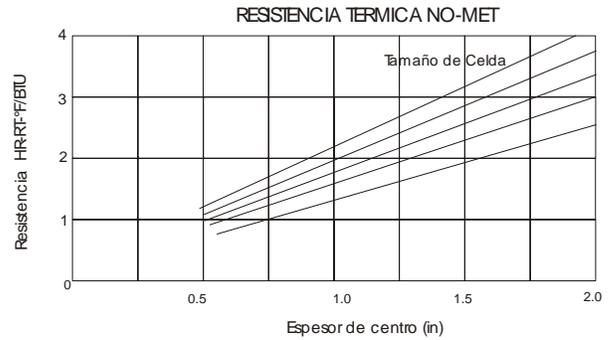
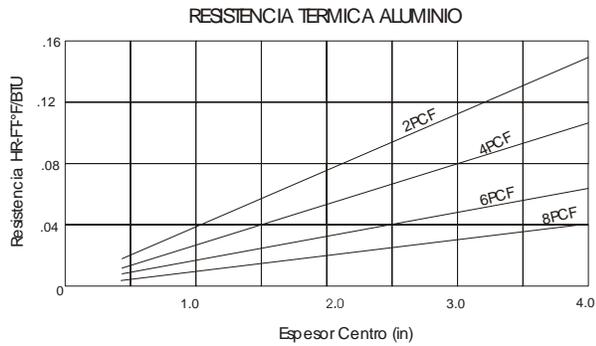


Figura II.1.2.a.- La conductividad térmica puede ser definida por la contribución de cada componente: caras, centro, y adhesivo. Las resistencias térmicas de cada componente pueden ser simplemente sumadas. Las propiedades térmicas de las caras típicas pueden ser consultadas en manuales. Los valores de resistencia térmica para un centro típico con caras pegadas con un paño de soporte es 0.03, y 0.01 para adhesivos sin soporte. Estas gráficas señalan la resistencia de aluminio y no metálico honeycomb para una temperatura de 23.9°C (75°F). Note que para los honeycombs no metálicos se ha encontrado que el tamaño de celda es más crítico que la densidad. Lo contrario con honeycombs de aluminio. Para saber la correcta temperatura, dividir la resistencia térmica a 23.9°C (75°F) por el coeficiente K.

## Papel honeycomb

El papel honeycomb es el primer antecesor de todos los tipos de honeycomb, produciéndose por mas de 2000 años. Estas primeras formas no fueron utilizadas como estructuras de centro, pero fueron empleadas como decoración y son frecuentemente vistas hoy en día como decoraciones de temporada en tiendas departamentales en formas de campanas expandidas, esferas, etc. Los materiales actuales como centros de emparedado son diferentes, en el cual el papel Kraft es el mas fuerte, y un 11-35% son resinas fenolicas utilizadas para mejorar las propiedades mecánicas, humedad y puntos de resistencia. Muchas variaciones se dan en celdas de 10.13 y 19mm (3/8,1/2, y 3/4 in) incluso mas grandes. Las versiones de alta resistencia son solamente producidas en pequeños tamaños de celda, los ensamblados de celdas de 10mm (3/8 in), se encuentran para especificaciones militares de resistencia MIL-H-104Q.

La mayoría de las aplicaciones son halladas fuera de la aeronáutica, donde el ahorro del costo es el primordial objetivo. La utilización está creciendo rápidamente en vehículos recreativos; para puertas, paredes, y partes; para la producción de gabinetes de cocina; extensiones de recámaras para casas, y producción de paredes para edificios comerciales. Propiedades mecánicas de varias aplicaciones comerciales de papel honeycomb son listadas en la Tabla.II.d.

TABLA II.d.- Propiedades Papel Kraft.

Hexagonal Honeycomb	Densidad Nominal $kg/m^3$	COMPRESIÓN		CORTANTE "Plato"			
		ESTABILIZADA		Dirección "L"		Dirección "W"	
		Resistencia	Módulo	Resistencia	Módulo	Resistencia	Módulo
		KPa.	MPa	KPa.	MPa	KPa.	MPa
		Típico	Típico	Típico	Típico	Típico	Típico
Resina impregnada (%)							
KP ¼-80(11)	80	2758	461	1324	208	593	45
KP 3/8-60(25)	37	1379	310	758	107	414	40
KP ½-60(25)	30	896	241	621	83	317	34
KP ½-80(11)	30	862	200	483	72	248	26
KP ½-80(18)	35	965	234	545	82	283	30
KP ¾-80(11)	21	496	110	303	44	165	16
KP ¾-80(18)	24	621	138	310	45	193	21
KP ¾-99(11)	24	462	62	359	44	193	26
KP ¾-99(18)	24	462	66	359	36	214	24
Desinpregnado							
KP 3/8-80(0)	34	496	128	317	51	214	26
KP ½-80(0)	30	441	114	290	48	193	23
KP ¾-80(0)	19	269	66	179	33	124	16
KP 1-80(0)	16	200	48	138	26	90	12
KP 1½-80(0)	10	97	17	69	15	48	7

\*La dirección L y W es relativo al posicionamiento de la muestra al realizar los ensayos de esfuerzo cortante para una viga (cap. II y III), en la cual el eje L se le identificará al eje de los valores de mayor resistencia obtenidos.

## Aluminio honeycomb

Esta familia de materiales ha estado en producción y crecimiento desde cerca de 1950. Aluminio honeycomb ahora incluye cuatro aleaciones, cinco formas de celdas, y muchas medidas de láminas para proveer un rango de densidades. Las aleaciones utilizadas son las siguientes:

\*3003-H19, la de mas baja resistencia del grupo, comúnmente usada para aplicaciones no-aeronáuticas.

\*5052-H39, la de mas alto grado de utilización en la aviación. Disponible con tratamiento superficial para resistencia a la corrosión. Las propiedades mecánicas son listadas en la Tabla II.e.

\*5056-H39, la de más alto grado de fortaleza utilizada en la aeronáutica, disponible con superficie resistente a la corrosión. Propiedades mecánicas son listadas en la Tabla II.e.

\*2024-T3 o -T81, la aleación con mayor resistencia al calor, y ligeramente mas fuerte en algunas propiedades que el 5056-H39. Disponible con tratamiento superficial para resistencia a la corrosión. Propiedades mecánicas son listadas en la Tabla II.f.

Algunas de las aleaciones antes mencionadas son disponibles en forma corrugada, corrugada y reforzada, sobre expandida, y celdas de flexibles configuraciones. Algunas también se han producido en geometrías especiales para hacer a todos los ejes ficticios a un eje radial verdadero de un cilindro, esfera u otras configuraciones. Lo mismo en láminas de aleaciones de Al las que pueden ser corrugadas en espiral para formar cilindros o tubos para las aplicaciones de absorción de energía.

El aluminio de centro para honeycomb sigue siendo lo más usado, así como el más versátil de varios materiales para centros obtenibles y es muy común encontrar un desarrollo favorable para este material y costo proporcional. El rango de centros de aluminio disponibles se extiende desde un valor pequeño de  $32 \text{ kg/m}^3$  ( $2 \text{ lb/ft}^3$ ) hasta  $192 \text{ kg/m}^3$  ( $12 \text{ lb/ft}^3$ ). Centros corrugados empiezan debajo de  $128 \text{ kg/m}^3$  ( $8 \text{ lb/ft}^3$ ) y pueden ser adquiridos arriba de  $880 \text{ kg/m}^3$  ( $55 \text{ lb/ft}^3$ ). A densidades menores de  $128 \text{ kg/m}^3$  ( $8 \text{ lb/ft}^3$ ) los centros corrugados sufren serias deficiencias en presencia de esfuerzos cortantes.

Tabla II.e.- Propiedades de Honeycomb Hexagonal Aluminio 5052

DESIGNACIÓN DE HONEYCOMB HEXAGONAL	DENSIDAD NOMINAL KG/M3	COMPRESIÓN					ESFUERZO COMPRESIÓN** KPa	CORTANTE "Plato Test"							
		DESCUBIERTO		ESTABILIZADO				DIRECCIÓN "L"			DIRECCIÓN "W"				
		RESISTENCIA		RESISTENCIA	MODULO			RESISTENCIA	MODULO	RESISTENCIA	MODULO				
		KPa		KPa	MPa			KPa	MPa	KPa	MPa				
CELDA-MATERIAL-MEDIDA		típico	mínimo	típico	mínimo	típico	típico	mínimo	típico	típico	mínimo	típico			
1/16-5052-0.0007	101	5998p		6274p		1896p				3516p		621p	2206p		276p
1/16-5052-0.001	144	10204x		10342x		2896x				5343x		724x	3585x		365x
1/8-5052-0.0007*	50	1862	1379	1999	1482	517	896	1448	1069	310	896	621	152		152
1/8-5052-0.001*	72	3585	2586	3758	2792	1034	1793	2344	1965	483	1517	1158	214		214
1/8-5052-0.0015*	98	5998	4482	6274	4688	1655	3103	3482	3137	676	2206	1875	283		283
1/8-5052-0.002*	130	9653	6895	10135	7584	2413	5171	4999	4619	931	3137	2758	372		372
1/8-5052-0.003	192	15168p		16030p		6205p				7584p		4309p			
5/32-5052-0.0007	42	1379	1034	1482	1103	379	621	1138	827	255	689	483	131		131
5/32-5052-0.001	61	2723	1965	2827	2068	758	1276	1862	1482	386	1207	862	182		182
5/32-5052-0.0015	85	4757	3378	4964	3689	1344	2344	2896	2551	579	1862	1482	248		248
5/32-5052-0.002	111	7446	5309	7791	5516	1965	3964	4068	3723	786	2586	2261	320		320
5/32-5052-0.0025**	135	10549	7377	11032	8136	2551	5516	5240	4757	965	3275	2896	386		386
3/16-5052-0.0007		890		689		234	414	827	552	186	483	317	99		99
3/16-5052-0.001*	50	1862	1379	1999	1482	517	896	1448	1069	310	896	621	152		152
3/16-5052-0.0015*	70	3447	2482	3620	2654	1000	1724	2275	1931	469	1482	1103	207		207
3/16-5052-0.002*		5300	3861	5585	4137	1517	2689	3172	2827	621	2068	1682	265		265
3/16-5052-0.0025	111	7446	3309	7791	5516	1965	3964	4068	3723	786	2585	2261	320		320
3/16-5052-0.003	130	9653	6895	10133	7584	2413	5171	4999	4619	931	3137	2758	372		372
1/4-5052-0.0007	26	586	414	655	483	138	276	586	414	5	345	221	76		76
1/4-5052-0.001	37	1138	827	1207	896	310	517	965	689	221	586	393	112		112
1/4-5052-0.0015	54	2206	1655	2344	1724	621	1034	1620	1241	345	1034	724	165		165
1/4-5052-0.002	69	3309	2413	3482	2551	965	1586	2206	1827	455	1448	1069	205		205
1/4-5052-0.0025	83	4619	3447	4757	3516	1310	2310	2827	2482	565	1827	1379	244		244
1/4-5052-0.003	96	5861	4344	6067	4551	1620	2965	3413	3068	662	2172	1827	279		279
1/4-5052-0.004*	127	9377	6688	9791	7239	2344	4999	4826	4482	896	3034	2689	364		364
3/8-5052-0.0007	16	207	138	310	138	69	172	310	221	83	207	138	48		48
3/8-5052-0.001	26	586	414	655	483	138	276	586	414	145	345	221	76		76
3/8-5052-0.0015	37	1138	827	1207	896	310	517	965	689	221	586	393	112		112
3/8-5052-0.002	48	1793	1310	1862	1379	483	827	1379	1000	296	862	586	146		146
3/8-5052-0.0025**	59	2551	1862	2689	1965	724	1241	1793	1379	379	1172	793	179		179
3/8-5052-0.003	67	3172	2310	3344	2448	931	1517	2137	1758	448	1379	1034	200		200
3/8-5052-0.004	86	4964	3447	5137	3689	1379	2482	2965	2620	593	1931	1572	254		254
3/8-5052-0.005**	104	6688	4826	7033	5171	1827	3482	3758	3447	724	2413	2068	300		300

**Tabla II.f.- Propiedades de Aluminio hexagonal 5056 y 2024**  
**5056 Hexagonal Aluminum Honeycomb**

HONEYCOMB HEXAGONAL DESIGNACIÓN	DENSIDAD NOMINAL kg/m <sup>3</sup>	COMPRESIÓN					RESISTENCIA COMPRESIÓN KPa	CORTANTE (Plato)					
		DESNUDO		ESTABILIZADO				DIRECCIÓN "L"			DIRECCIÓN "W"		
		RESISTENCIA		RESISTENCIA	MODULOS			RESISTENCIA	MODULO	RESISTENCIA	MODULO		
		KPa		KPa	MPa			KPa	MPa	KPa	MPa		
CELDA-MATERIAL-MEDIDA		typical	minimum	typical	minimum	typical	typical	typical	minimum	typical	typical	minimum	typical
1/16-5056-0.0007	101	6894x		7584x		2275x		4447x		655x	2551x		262x
1/16-5056-0.001	144	11721p		12410p		3447p		6756p		758p	4136p		344p
1/8-5056-0.0007+	50	2344	1723	2482	1792	668	1172	1723	1378	310	1068	758	137
1/8-5056-0.001+	72	4343	3275	4619	3447	1275	2206	2930	2413	482	1758	1413	262
1/8-5056-0.0015	98	6895	5240	7584	5688	1034	3689	4413	3620	703	2551	2103	262
1/8-5056-0.002	130	10480	8274	11721	8963	2999	5585	6205	5102	986	3585	3034	352
5/32-5056-0.0007	42	1758	1241	1793	1276	483	827	1379	1048	248	827	552	117
5/32-5056-0.001	61	3275	2482	3447	2586	965	1620	2310	1875	393	1413	1069	165
5/32-5056-0.0015	85	5654	4240	5964	4482	1655	2896	3654	2999	586	2187	1724	228
5/32-5056-0.002	111	8412	6373	9239	6895	2413	4482	5240	4206	814	2965	2482	296
3/16-5056-0.0007	32	1069	758	1103	827	310	517	965	724	186	586	345	90
3/16-5056-0.001+	50	2344	1724	2482	1793	669	1172	1758	1379	310	1069	758	238
3/16-5056-0.0015	70	4137	3172	1182	3378	1241	2137	2827	2344	469	1689	1365	190
3/16-5056-0.002	91	6274	4723	6757	5068	1862	3309	4033	3309	648	2344	1931	248
1/4-5056-0.0007	26	689	517	758	552	207	345	621	538	138	414	262	83
1/4-5056-0.001+	37	1413	1000	1448	1069	400	689	1172	896	221	724	427	103
1/4-5056-0.0015	54	2723	2068	2896	2172	793	1379	1999	1586	345	1207	896	152
1/4-5056-0.002	69	3999	3034	4275	3206	1186	1068	2758	2241	462	1655	1310	186
1/4-5056-0.0025	83	5447	4137	5654	4447	1586	2827	3447	2930	579	2068	1689	221
3/8-5056-0.0007	16	241	172	345	241	103	241	414	310	103	241	172	62
3/8-5056-0.001	26	689	517	758	552	207	345	621	538	138	414	262	83
3/8-5056-0.0015	37	1413	1069	1448	1069	400	689	1172	896	221	724	427	103
3/8-5056-0.002	48	2206	1655	2344	1793	634	1103	1689	1310	296	1000	689	131

**2024 Hexagonal Aluminum Honeycomb**

		typical	minimum	typical	minimum	typical	typical	typical	minimum	typical	typical	minimum	typical
1/8-2024-0.0015	80	4826	3620	5378	4275	1379	2930	3447	2758	565	2172	1724	228
1/8-2024-0.002	107	7584	5688	8446	6757	1068	4413	5240	4137	814	3241	2586	310
1/8-2024-0.0025	128	10204	7584	11376	9101	2620	5792	6619	5309	1020	4068	3241	372
1/8-2024-0.003	152	13583	10170	15858	11893	3309	7722	7929	6550	1172	4482	4033	441
3/16-2024-0.0015	56	2275	1724	2551	1999	593	1379	1999	1586	379	1241	986	159
1/4-2024-0.0015	45	1517	1138	1724	1207	276	758	1379	965	290	827	607	131

\*Aluminio Honeycomb Corrugado 5052 y 5056 es disponible en altas densidades y resistencias arriba de 41000KPa. Los datos obtenidos son en espesores de 16mm. P=propiedades preliminares; x=valores calculados

+ Centros comunmente disponibles

\*\* Esfuerzos promedios.

## **Plástico honeycomb**

Esta familia de materiales es comúnmente utilizada en partes eléctricas sensibles, como radares y antenas, donde la resistencia al calor y la baja conductividad térmica hacen de estos una selección natural. Esto los ha hecho ver de buena utilidad como matrices para retener materiales abatibles no estructurales, como son las gomas de silicón suaves o las espumas de epoxica rígidas sintéticas, las cuales por otro lado no pudieron ser usadas eficientemente como escudos de calor en los vehículos de re-entrada Apolo y Gemini. Sólo poliéster cubierto de nylon-fenolico, fenolico de alta temperatura, y centros de poliamida son producidos en E.U. Estos están disponibles en tamaños de celdas de 5,6,3, y 10mm (3/16,1/4, y 3/8in) y celdas de 3mm (1/8in) con reforzamiento de texturas tejidas. Densidades con un rango de  $32-192\text{ kg/m}^3$  ( $2-12\text{ lb/ft}^3$ ). Propiedades mecánicas de varios centros comercialmente disponibles de fibras de vidrio reforzadas se muestran en la tabla II.g y II.h.

Tabla II.g.- Propiedades de la fibra de vidrio comunmente utilizados.												
HONEYCOMB		COMPRESIÓN					CORTANTE "Plato"					
HEXAGONAL		DESNUDO		ESTABILIZADO			DIRECCIÓN "L"			DIRECCIÓN "W"		
DESIGNACIÓN		RESISTENCIA		RESISTENCIA		MODULO	RESISTENCIA		MODULO	RESISTENCIA		MODULOS
MATERIAL-CELDA-DENSIDAD		KPa		KPa		MPa	KPa		MPa	KPa		MPa
Hexagonal		typical	minimum	typical	minimum	typical	typical	minimum	typical	typical	minimum	typical
	HRP-3/16-4.0	3447	2413	4137	3309	393	1793	1448	79	965	758	34
	HRP-3/16-55	5516	4137	6481	5171	655	2930	2551	134	1517	1310	59
	HRP-3/16-7.0	7929	6205	8481	6895	938	3447		193	1999		86
	HRP-3/16-8.0	9653	7534	11032	8825	1131	4551	4137	234	2758	2551	103
	HRP-3/16-12.0	15720	11032	15858	12411	1793p	6481p	5619p	379p	3930p	3447p	172p
	HPR-1/4-3.5	2413	1793	3447	2758	317	1586	1172	62	827	689	24
	HPR-1/4-4.5	4344	3103	4826	3861	483	2068	1724	97	1172	965	41
	HPR-1/4-5.0	4826	3516	5654	4551	579	2344		117	1379		52
	HPR-1/4-6.5	7067	5861	8136	6205	827	3103		172	1793		76
	HPR-3/8-2.2	1034	724	1379	1000	90	724	517	34	414	310	14
	HPR-3/8-3.2	2206	1689	3034	2413	262	1379	1103	55	724	586	21
	HPR-3/8-4.5	4206	3103	4757	3792	448	2068	1793	97	1172	1034	41
	HPR-3/8-6.0	6205	5171	6895	5171	689	2758	2344	155	1793	1448	69
	HPR-3/8-8.0	7308	6343	8274		1034p	3585		214p	2206		90p
<b>Ox-Core</b>												
	HRP/OX-1/4-4.5	3585	2413	4309p		296p	1448		55	1724		105
	HPR/OX-1/4-5.5	5585	4137	6550p		448p	1862p		72	2275		124
	HRP/OX-1/4-7.0	7929		8481p		579p	2723p		97p	3103p		138p
	HRP/OX-3/8-3.2	2344	1793	2930p		22p	965		31p	1034p		62p
	HRP/OX-3/8-5.5	4826	3999	5654p		414p	1655		69p	2068p		117p
<b>Flex-Core</b>												
	HPR/F35-2.5	1241		1655		172	862p		86p	483p		48p
	HPR/F35-3.5	2206		2758	2068	255	1379	965	103	724	517	69
	HPR/F35-4.5	2834		4137		338	1931		152	965		83
	HPR/F50-3.5	2068		2930	2068	255	1344	965	138	689	517	69
	HPR/F50-4.5	2758		4137	3447	338	1827	1379	172	965	689	90
	HPR/F50-5.5	4137p		6067p		42p	2689p		217p	1413p		110p
* Pruebasobtenidoscon 12.70mm de espesor												
p,+=propiedadespreliminares												

**Tabla II.h.- Propiedades de la fibra de vidrio para usos especiales**  
Vidrio reforzado Polvimide Honeycomb

HONEYCOMB HEXAGONAL DESIGNACIÓN MATERIAL-CELDA-DENSIDAD	COMPRESIÓN			CORTANTE "Plato"					
	ESTABILIZADO			DIRECCIÓN "L"			DIRECCIÓN "W"		
	RESISTENCIA		MODULO	RESISTENCIA		MODULO	RESISTENCIA		MODULO
	KPa		MPa	KPa		MPa	KPa		MPa
	typical	minimum	typical	typical	minimum	typical	typical	minimum	typical
HRH 327-3/16-4.0	3033		344	1930		199	896		68
HRH 327-3/16-4.5	3585	2757	399	2206	1516	227	1034	758	75
HRH 327-3/16-5.0	4136		468	2551		255	1241		86
HRH 327-3/16-6.0	5377	4309	599	3171	2378	310	1585	1172	103
HRH 327-3/16-8.0	8963	6894	868	4481	3447	427	2826	2275	151
HRH 327-3/8-4.0	3033	2270	344	1930	1344	199	1034	689	82
HRH 327-3/8-5.5	4688	3723	537	2895	2068	282	1447	1103	93
HRH 327-3/8-7.0	6894p		430p	3792p		365p	2137p		127p

Vidrio reforzado Phenolic Honeycomb (entretrejido)

HONEYCOMB HEXAGONAL DESIGNACIÓN MATERIAL-CELDA-DENSIDAD	COMPRESIÓN			CORTANTE "Plato"			
	DESNUDO	ESTABILIZADO		DIRECCIÓN "L"		DIRECCIÓN "W"	
	RESISTENCIA	RESISTENCIA	MODULO	RESISTENCIA	MODULO	RESISTENCIA	MODULO
	KPa	KPa	MPa	KPa	MPa	KPa	MPa
	typical	typical	typical	typical	typical	typical	typical
HFT-1/8-3.0	2068p	2413p	151p	1275p	117p	655p	48p
HFT-1/8-4.0	2688p	3964p	310p	2068p	220p	1034p	82p
HFT-1/8-5.5	3619p	6618p	461p	2930p	289p	1551p	117p
HFT-1/8-8.0	9997p	11203p	689p	3964p	331p	2344p	172p
HFT-3/16-1.8	517p	827p	97p	724p	89p	344p	27p
HFT-3/16-2.0	689p	1172p	117p	792p	103p	413p	34p
HFT-3/16-3.0	1896p	2585p	220p	1378p	165p	689p	62p
HFT-3/16-4.0	2999p	3792p	310p	1896p	206p	965p	82p
HFT/OX-3/16-6.0	6894p	7584p	461p	1999p	89p	2309p	206p

\* Pruebas en piezas de 12.70mm de espesor. Normalmente en ensayos de compresión

p,+ = propiedades preliminares

### **Papel Aramid honeycomb.**

Este es un producto de dureza y resistencia especial, hecho completamente sintético, de papel calandrado (lustrado) "Nomex" material producido por DuPont. El centro es muy expandible como el aluminio, y se zambulle cubriéndose con resina fenólica u otra resina sustituible. Las propiedades mecánicas del material, como centro estructural, son menores que el aluminio especialmente en los módulos, pero este posee una habilidad única de soportar sobrecargas en áreas locales sin una aplicación constante. Debido a su resistencia se aplica bastante en interiores de tableros o pisos de aeronaves, y esto resulta que sea muy competitivo incluso de los altos costos que este representa. La base del material es relativamente incombustible, y las pequeñas cantidades de material que presenta en un tablero típico producen pequeños volúmenes de humo y gases en los resultados de pruebas de fuego. En aplicaciones típicas hacen uso de estas propiedades muy efectivas, y ha tenido un crecimiento para colocarse en el segundo más utilizado en estructuras de aeronaves (detrás del aluminio). Los usos fuera de la industria aeroespacial son limitados debido al alto costo del material, pero a pesar de esto, se ha visto en algunas aplicaciones de cascos de barcos arriba de 1.02m (4ft) de extensión, en esquís, pisos autos de carreras y otros productos.

Los centros Aramid son normalmente producidos en tamaños de celdas de 3, 5, 6.5, y 10mm (1/8, 3/16, 1/4, y 3/8 in.), en densidades de 24 a 144  $kg/m^3$  (1.5-9  $lb/ft^3$ ). Densidades mayores de 64  $kg/m^3$  (4  $lb/ft^3$ ), son usadas casi solamente para pisos de aeronaves. Propiedades mecánicas de algunos de estos materiales se muestran en la Tabla II.i.

Tabla II.i.- Propiedades del honeycomb de Papel Nomex												
HONEYCOMB		COMPRESIÓN					CORTANTE "Plato"					
HEXAGONAL		DESNUDO		ESTABILIZADO			DIRECCIÓN "L"			DIRECCIÓN "W"		
DESIGNACIÓN		RESISTENCIA		RESISTENCIA		MODULO	RESISTENCIA		MODULO	RESISTENCIA		MODULOS
MATERIAL-CELDA-DENSIDAD		KPa		KPa		MPa	KPa		MPa	KPa		MPa
Hexagonal		typical	minimum	typical	minimum	typical	typical	minimum	typical	typical	minimum	typical
	HRH 10- 1/8-1.8 (1.5)	758	482	896	586		620	448	25	344	248	13
	HRH 10- 1/8-3.0 (2)	2068	1241	2275	1861	137	1241	1116	48	655	586	24
	HRH 10- 1/8-4.0 (2)	34473	2275	3861	3270	193	1689	1551	63	965	758	32
	HRH 10- 1/8-5.0 (3)	6205	4136	6377	4550		2240	1620		1206	827	
	HRH 10- 1/8-6.0 (3)	7411	5515	7756	5688	413	2551	1792	89	1378	930	41
	HRH 10- 1/8-8.0 (3)	10859	7584	11721	8618	537	3378	2447	110	1723	1310	53
	HRH 10- 1/8-9.0 (3)	11721	9652	12410	11031	620	3585	2551	117	1861	1654	62
	HRH 10- 5/32-5.0 (4)	5515p		6205p			2482p		72	1241p		34
	HRH 10- 5/32-9.0 (4)	12238p		14134p			3619p		124	1965p		65
	HRH 10- 3/16-2.0 (2)	1034	620	1172	723	75	758	496	28	379	275	15
	HRH 10- 3/16-3.0 (2)	2068	1241	2275	1861	137	1034	896	34	655	461	24
	HRH 10- 3/16-4.0 (2)	3447	2206	3861	3240	193	1689	1482	53	965	758	32
	HRH 10- 3/16-4.5 (5)	2930	2206	3275	2757		1999	1551	65	999	758	27
	HRH 10- 3/16-6.0 (5)	4481	3998	7826	4481		2688	2275	99	1275	1034	41
	HRH 10- 1/4-1.5 (2)	620	310	655	379	41	517	310	20	241	158	10
	HRH 10- 1/4-2.0 (2)	1034	551	1172	723	75	758	496	28	379	248	19
	HRH 10- 1/4-3.1 (5)	1896	1241	1965	1654		1172	930	48	586	413	10
	HRH 10- 1/4-4.0 (5)	2551	2137	2757	2482		1654	1378	51	861	655	24
	HRH 10- 3/8-1.5 (2)	620	310	655	379	41	517	310	20	241	158	10
	HRH 10- 3/8-2.0 (2)	1034	551	1172	723	75	758	496	28	379	248	15
	HRH 10- 3/8-3.0 (5)	1965p		2068p		117p	1172p		38p	655p		20p
<b>Ox-Core</b>												
	HRH 10/OX - 3/16-1.8 (2)	758	482	896			413	310	13	413	241	20
	HRH 10/OX - 3/16-3.0 (2)	2516	1723	2757	1861	11	792	655	20	861	655	41
	HRH 10/OX - 1/4-3.0 (2)	2413	1447	2654	1723	117	758	620	20	792	620	41
<b>Flex-Core</b>												
	HRH 10/F35-2.5 (3)	1034	723	1172	820	82p	482	337	27p	275	193	13p
	HRH 10/F35-3.5 (5)	2068p		2413p		16p	1034p		39p	551p		19p
	HRH 10/F35-4.5 (5)	3102p		3378p		227p	1861p		59p	1034p		25p
	HRH 10/F50-3.5 (3)	2068	1303	2413p	1496	16	1034	6929	39p	551	386	19p
	HRH 10/F50-4.5 (5)	3102p		3378p		227p	1861p		50p	1034p		25p
	HRH 10/F50-5.0 (5)	3792		4309	3619	255	2275	2068	55	1310	1103	28
	HRH 10/F50-5.5 (5)	4481p		4826p		289p	2688		60p	1620		31p
Datos de prueba para espesores de 12.70mm												
p,+=propiedades preliminares												

### II.1.3.- Materiales de Unión-Adhesivos.

#### Factores generales y Materiales

Como ellos se aplican a estructuras de emparedado, constituyen una familia diferente de materiales a la de aquellos que no requieren vincular las celdas abiertas del centro con una continua cara. Aunque estas diferencias son menos importantes con algunas novedades y mejoramiento de las epoxicas, los adhesivos continúan siendo básicos y deben ser entendidos por el diseñador y fabricante para que inevitables problemas sean eludidos. Algunos factores que requieren de nuestra atención son discutidos:

#### Productos que se pueden generar durante el pegado

Algunos tipos de adhesivos, como fenólicas, emiten vapor como producto de la reacción de curación, y la presencia de estos materiales secundarios puede provocar severos problemas:

- \*Presión interna, resultando deficiencia o no pegado en algunas áreas, o formación de ampollas.
- \*Fraccionamiento del centro, al buscar el gas un camino hacia la área de menor presión se abre camino produciendo fracturas.
- \*Movimiento de centro, algunas veces muchas pulgadas, resultando en una parte inutilizable.
- \*Corrosión posterior del centro y caras debido a la acción química del vapor y su condensación.

#### Presión de unión

Adhesivos como las fenólicas y algunos otros actualmente requieren mas que la simple presión atmosférica para prevenir excesiva porosidad. Ciertas formas pueden ser convenientes para centros sólidos como la balsa, pero no puede ser utilizado en centros abiertos o largos como las espumas de grandes longitudes. También, la mayoría de los centros no pueden soportar por ellos mismos cargas de unión mayores a unas cuantas atmósferas, y consecuentemente no pueden ser utilizados con cualquier sistema de adhesión que requiera altas presiones.

## Formación de bordes.

Para lograr un buen pegado de un centro de celdas abiertas, como los honeycomb, el adhesivo debe tener una única combinación de superficies mojadas y controlar el flujo antes del estado de curado. Controlar el flujo previene al adhesivo fluir debajo de la pared de la celda y dejando una capa de baja fuerza y un exceso peso innecesario en el fondo.

## Adaptabilidad

Los requerimientos notados anteriormente deben ser reunidos, conociendo también todos los requerimientos de piel-a-piel o piel-a-doble fijación.

En el caso de partes contorneadas, el adhesivo debe ser también un buen "rellenador de huecos" sin la omisión de una fuerza apreciable, el control de la tolerancia de los detalles es más difícil lograrlo en tableros contorneados que en tableros planos, y un grado mayor de tolerancia para el acoplamiento normalmente debe permitirse.

## El Control de Línea de Unión

Es una necesidad que existe debido a los detalles fuera de geometría, que es lo opuesto a la adaptabilidad. Esto es la capacidad del adhesivo para resistirse cuando esta siendo apretado hacia fuera de las superficies con excesiva presión que se aplica durante el curado en una área. Se formulan muchos adhesivos para lograr una buena cinta de unión de los centros y el flujo es subsecuentemente controlado por la adhesión de una tela de fibras (una red), moldeada dentro de la espesa cinta de adhesivo. Esta red previene el escurrimiento de las superficies al ser exprimidas, que podría resultar una área de débil.

## La Dureza

La palabra dureza tiene varios significados en el mundo de los adhesivos. Comúnmente nos referimos a la resistencia mostrada por el adhesivo de no permitir el crecimiento de grietas bajo un impacto de cargas esto en la línea de unión. En la zona del emparedado (unión centro-caras), esto se refiere a la resistencia mostrada del adhesivo con cargas que actúan para separar el centro de las caras bajo condiciones estáticas y dinámicas. Con la experiencia se ha fundamentado que a mayores durezas en la línea de unión comúnmente equivale a mayor resistencia, y así mayor tiempo de vida útil.

Muchos tipos de pruebas se han ideado para medir la resistencia, pero la más común utilizada en estructuras de tipo emparedado es la de Elevación del Barril (climbing drum) figura II.b. Esta prueba tiene la virtud de ser fácilmente reproducida, poseyendo una relación obvia al valor del que se busca. Los valores de resistencia al desprendimiento de la cubierta o caras varían considerablemente, dependiendo en:

- Dureza del adhesivo
- Cantidad del adhesivo utilizado
- Densidad del centro
- Tamaño de la celda del centro
- Dirección de la cáscara, piel (en dirección o cruzado de la dirección de la cinta)
- Suficiente superficie de prueba
- Degradación de la superficie adherente después de la unión.

Por que estas variables pueden conducir a grandes diferencias de esfuerzos de cáscara para el mismo adhesivo, todas ellas deben propiamente ser entendidas y controladas si se quiere usar la prueba y comparar con otros resultados.

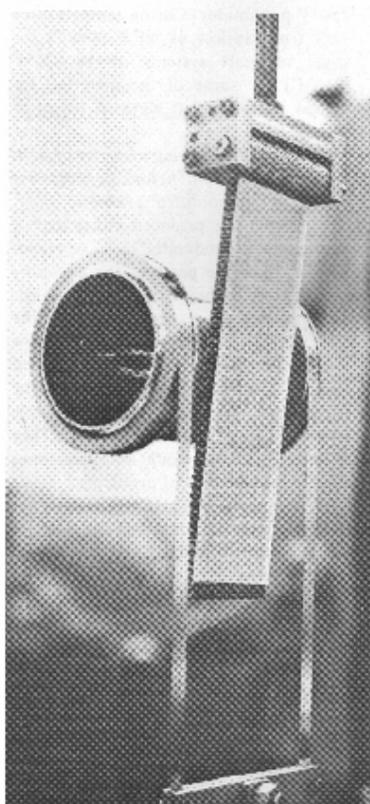


Figura II.b.- Prueba Elevación del Barril (climbing drum) para la adecuada adhesión de la cara. La diferencia del diámetro del cilindro sujetado con correas produce que el cilindro tienda a girar en sentido de las manecillas del reloj cuando se le aplican tensión por la maquina de pruebas universal. Este arreglo es de fácil duplicación.

Este examen de desprendimiento de las caras es utilizado para control de calidad en la industria de materiales tipo emparedado. Este también puede ser llevado a cabo con casi cualquier material para las caras, excepto cuándo las caras están muy delgadas o muy rígidas siendo a su vez muy frágiles.

Puede verse fácilmente la diferencia entre los adhesivos utilizados en estructuras tipo emparedado y la de adhesivos utilizados en otras estructuras. Afortunadamente para los usuarios de estructuras emparedados, muchos adhesivos son disponibles con las características requeridas. Los tipos de adhesivos disponibles, con algunas características propias, son los siguientes:

#### 1.- Fenólicas combinadas con Viniles, Hules o Epóxica.

Todas estas familias de adhesivos emiten por lo menos cierta cantidad de agua durante la cura, y son utilizados solo donde sus propiedades mecánicas, alto esfuerzo, durabilidad o alta temperatura son esenciales. Ya que los productos que producen gases durante la curación usualmente requieren ventilación o perforar el material de centro, un número de adhesivos de alta temperatura que no producen gases durante la curación ya son disponibles.

Su utilización como adhesivos de emparedado ha declinado en los años recientes.

#### 2.- Epóxicas modificadas con Nylon u otro polímero Polyamida.

Estos adhesivos fueron los primeros en tener excelente unión y control del flujo junto con una alta dureza y alta rigidez, aunque son un poco sensibles a la humedad. Algunas versiones se proporcionan como cintas adhesivas de uno o dos lados, en las cuales el otro lado es goma o vinyl-fenólica, para proveer tanto una excelente capa y durabilidad en el lado de la cara, con una excelente cubierta en el lado del centro.

#### 3.- Nitrilo modificado epóxica.

Éstos constituyen un grupo amplio de los más recientes materiales que proporcionan el flujo y dureza mostrado por el nylon-epòxico, junto con la durabilidad y resistencia en diferentes ambientes de los vinilo-fenólicos. Ellos son los más comunes de los adhesivos endurecidos a ciertas temperaturas y son comúnmente limitados a una temperatura de servicio alrededor de 149°C

(300°F.). Algunos de estos materiales comúnmente usados logran esfuerzos cortantes de 34,000KPa (500psi), y la mayoría pueden ser curados encima de un amplio rango de temperaturas y presiones.

#### 4.- Uretanos.

Adhesivos basados en uretanos son usados en muchas estructuras comerciales.

#### 5.- Otras poliamidas, termoplásticos, adhesivos de alta especialización.

Estos son utilizados en un número de aplicaciones por arriba de una temperatura de servicio de 371°C (700°F), pero no representa un gran grupo de materiales. En adición para categorizar los adhesivos disponibles por su tipo químico, ellos pueden ser agrupados por la forma en que son disponibles. Generalmente estas son las siguientes:

- Líquidos ligeros, líquidos pesados, pastas, masillas, o espumas sintéticas. Solo algunos de ellos son usados como unión de centro-caras, pero muchos de estos materiales son usados en la construcción de emparedados para empalmar piezas de centros; para proveer ejes de alto esfuerzo, áreas, o superficies; para llevar cargas cortantes de los montajes, insertos, o salientes en los extremos; y para otros usos. La mayoría de los materiales también usados son las epòxicas, epòxicas modificadas o epòxicas poliamidas. Temperaturas de curación varían desde bajas como 40°F (4.4°C) para sistemas de dos etapas de pegado, arriba de 420°F (216°C) para algunos de los materiales para servicio a altas temperaturas.
- Películas de soporte teniendo un portador de fibra de vidrio ligero, algodón, nylon, paño de poliéster, o hilado de fibra sintética. Estos tipos son provistos tanto seco y con ligero a moderada tenacidad, así las partes del ensamblaje permanecen en su lugar mientras son ensamblados.
- Cintas sin apoyo, contienen solo el adhesivo, sin refuerzo. Las cintas de muy bajo peso casi siempre son provistas sin refuerzo, como el peso de los refuerzos por si solos es tangible estas estructuras emparedado son muy ligeras. Ellas son difíciles de manejar y en ocasiones tienen problemas en el control de la línea de unión.
- Película de recubrimiento. Estos son pensados para el uso de muy bajos pesos, en el cual se funde el adhesivo después de ponerlo encima del centro, así va delineando el eje de la celda y deja material para formar una unión lo mas larga posible sin desperdiciar nada dentro de la superficie de las caras y en medio de la celda.

- Pieles autoadhesivas. Estas pieles estructuralmente fabricados de vidrio, grafito, cuarzo, o cubierta de aluminio fibras de vidrio preimpregnadas con una resina, la cual es curada así que la resina completa de fibra se vuelve tanto la cara de la estructura como el material de unión.

Todos los tipos anteriores de adhesivos son de uso común y sustancial volumen, la mayoría de estos son disponibles. Tabla II.j.

**TABLA II.1.j.- Adhesivos de uso comercial**

<b>ADHESIVO</b>	<b>DESIGNACIÓN</b>	<b>PROVEEDOR</b>
Nitrilo fenolico	FM 238 AF 30, AF 31, AF 32 Metlbond 402 Plastilock 655,638,620,650	American Cyanamid 3M company Narmco BF Goodrich
Vinyl fenolica	FM 47	American Cyanamid
Epoxica fenólica 176.6°C (350°F)	HT 424	American Cyanamid
Modified epoxica Pasta y liquida	M-6803, M-6860 R471, R380 EA 9320, Ea 9309, Ea 934 Ma 1015, Ma 2021 Crest 471, 3135 EC 2216 A1396B, A1444B, A1446B	Narmco Ciba-Geigy Hysol McCann Adhesives Crest Products 3M Company BF Goodrich
Modified epoxica 121°C(250°F) cura	Crest 3181 EA 9601, EA 9602.3, EA 9628 MA 229, MA 429, MA 456 FM 24, FM 53, FM 73, FM 123, FM 137 Metlbond 117, M1113, M 1137, M 1204. Plastilock 717B Reliabond R382, R393, R7114 AF 126, AF 126-2 HP 347	Crest Products Hysol McCann Adhesives American Cyanamid Narmco BF Goodrich Ciba-Geigy 3M Company Hexcel Corporation
Modified epoxica 176.6°C (350°F) cura	Metlbond 328, 329, 329-7, 1515 AF 130, AF 143, AF 147 FM 61, FM 96, FM 150-2, FM 300, FM 400 Plastilock 729-3 Reliabond 398 MA 529 EA 9649	Narmco 3M Company American Cyanamid BF Goodrich Ciba-Geigy McCann Adhesives Hysol
Epoxy /polamida	A1177B, A1273B EA 951 FM 100	BF Goodrich Hysol American Cyanamid
Polamida	FM34B-18 HP955, HP956	American Cyanamid Hexcel Corporation
Urethanes modified	Crest 7410, 7450, 7395 Metlbond 6872, 6875, 6876 EC 3549 Plastilock 550	Crest Products Narmco 3M Company BF Goodrich
Core Splicing adhesives	Crest 3181, 3158 Metlbond 6602,6607,6601,6603 FM 37, FM 39, FM 40, FM 41, FM 47-type o, FM 404 Reliabond 370B, 370C MA 550, MA 2150 EA 9815, Thermofoam 3050, 3056 AF 3002, AF 3015 HP905, HP906 Plastilock 654, 658	Crest products Narmco American Cyanamid Ciba-Geigy McCann Adhesives Hysol 3M Company Hexcel Corporation BF Goodrich

### II.1.4.- Propiedades del Centro Honeycomb

Las propiedades del centro honeycomb se ven significativamente influenciadas por la densidad, forma, tamaño y espesor de la celda del centro del panel mas que los materiales básicos utilizados.

- *Densidad*.- Con grandes densidades todas las propiedades mecánicas son incrementadas, como se muestra en la Fig. II.c. y II.d.

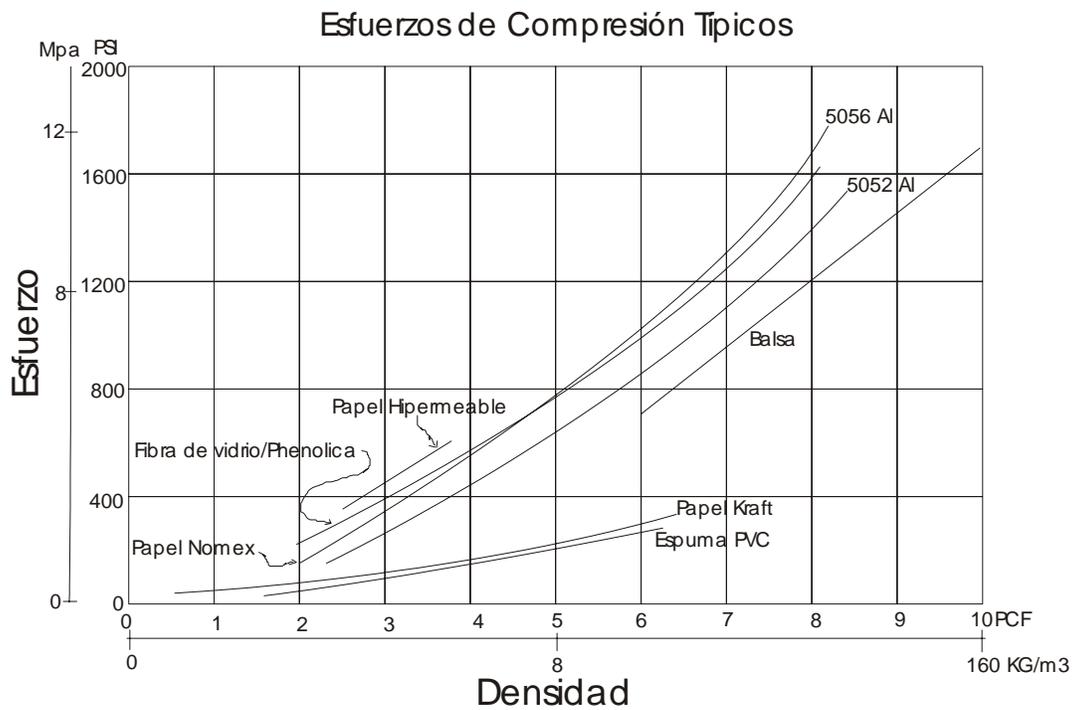


Figura II.c .- Muestra el aumento de la resistencia a la compresión, debido al aumento de la densidad del honeycomb de diferentes materiales.

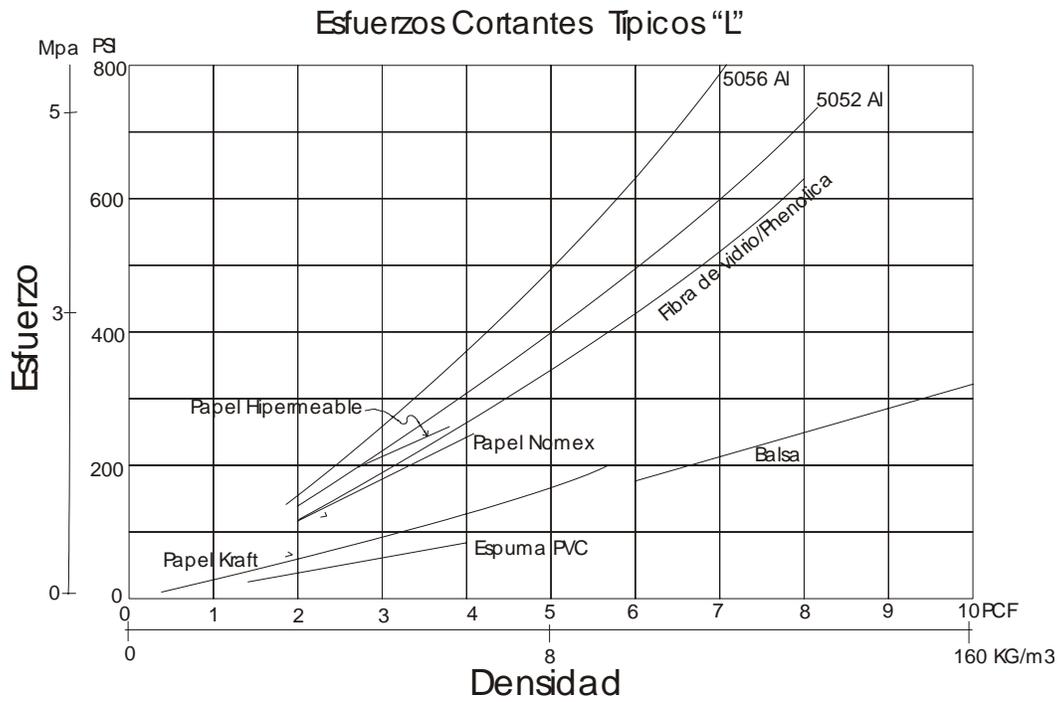


Figura II.d.- Muestra el aumento de la resistencia al esfuerzo cortante, debido al aumento de la densidad del honeycomb de diferentes materiales.

- Forma de la celda.-** Toda estructura honeycomb es anisotrópica, y la resultante direccional de las propiedades debe adaptarse anticipadamente a las cargas. La figura II.e. muestra diferencias típicas en los esfuerzos para las direcciones L y W. Además, algunas formas de la celda permiten la formación de encorvaduras a causa de una pérdida pequeña de esfuerzo proporcional al peso. Esta característica puede ser de gran importancia en la elaboración de partes de apreciable delgadez. Las variaciones de la forma de la celda también pueden ser modificadas dependiendo de la manufactura del material o en ciertos materiales como el aluminio, las formas pueden ser intencional o inadvertidamente alteradas. Debe notarse que si estiramos o comprimimos el panal sufrirá cambios tanto en la forma como en la densidad. La versión estirada Fig. II.f. (caso C), cambia la dirección de las propiedades, la dirección L se vuelve ligeramente el débil de estos dos ejes. Este cambio del esfuerzo en la dirección L puede equivaler a un 30%, por lo que tales cambios no se pueden dar por error.

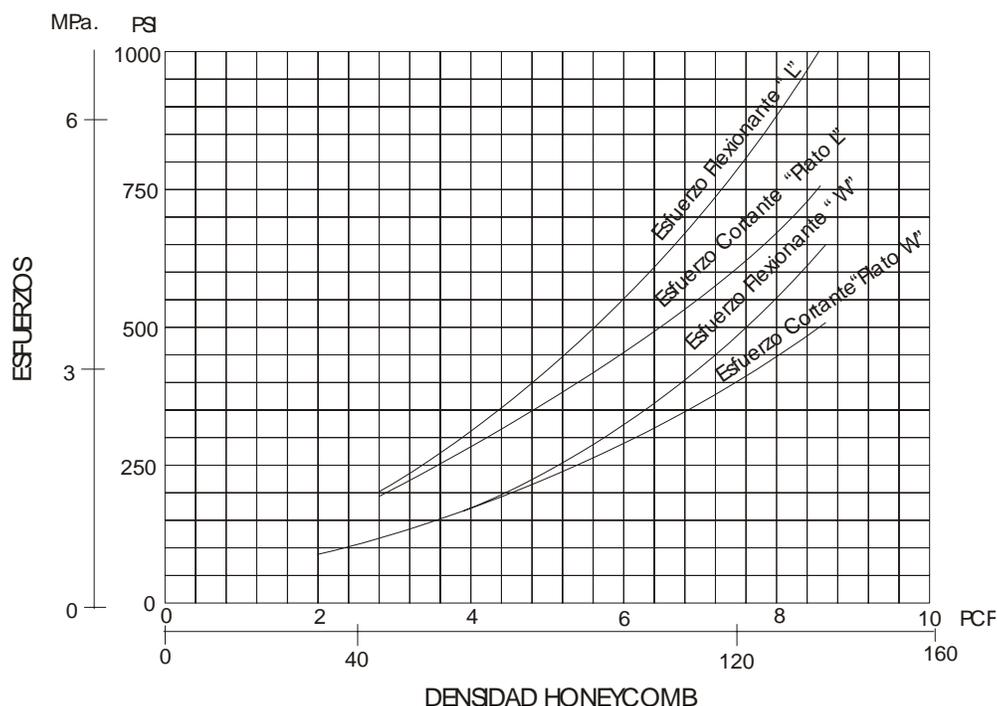


Figura II.e.- Valores típicos mediante el método de plato cortante, en honeycomb de aluminio 5052, en las diferentes direcciones.

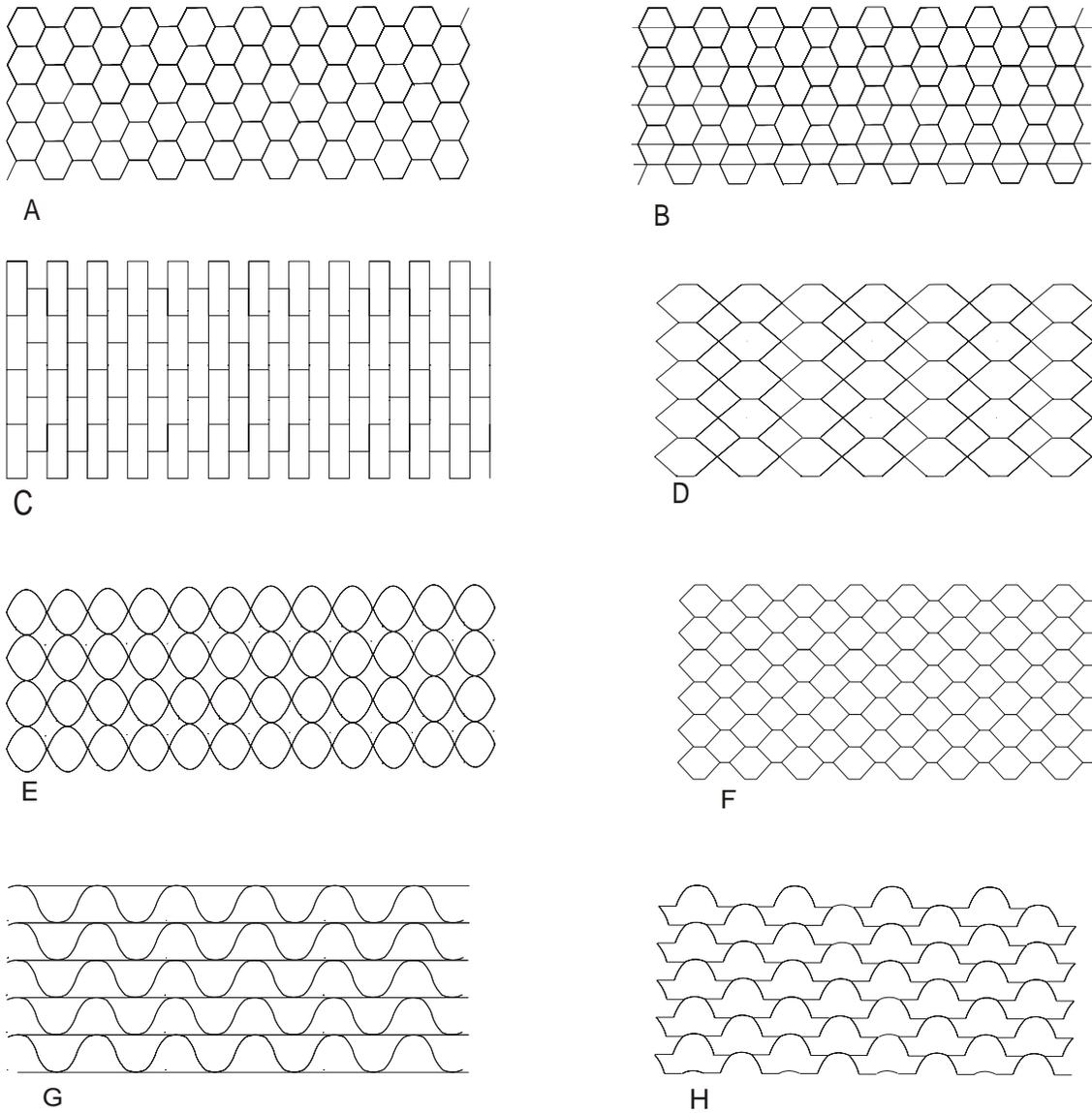


Figura II.1.4.e.- Varias configuraciones de celdas de uso común. B y C son producidas por el método de corrugado. D es una configuración de celdas de metal soldadas. C es flexible en un eje, como E en ambos ejes. A, C y F son expandidas de pliegos del mismo tipo, siendo A expansión normal, C completamente sobre-expandido y D 50% de expansión. B es centro corrugado reforzado, con una capa extra plana puesta entre la laminas corrugadas. Las láminas de reforzamiento pueden ser adheridas en ciertas localidades o patrones y pueden ser del mismo o diferente espesor y material.

- *Tamaño de celda.*- Aunque el tamaño de la celda tiende a ser una variable secundaria para la mayoría de las propiedades mecánicas del material del centro, es muy importante determinar los niveles de esfuerzo para ciertas geometrías donde se produce la cedencia o doblamiento de la estructura.
- *Espesor.*- Las propiedades de esfuerzos cortantes y de compresión obtenidas para un centro o relleno específico pueden ser realizadas mediante métodos de prueba cuándo el espesor es cuidadosamente especificado y controlado para un tipo de centro específico. Fallas debidas al efecto del espesor pueden afectar las propiedades cuatro veces o más, como se muestra en la Fig. II.f. Debemos enfatizar que el factor de corrección mostrado puede ser considerado diferente, dependiendo del tipo de material y espesor.

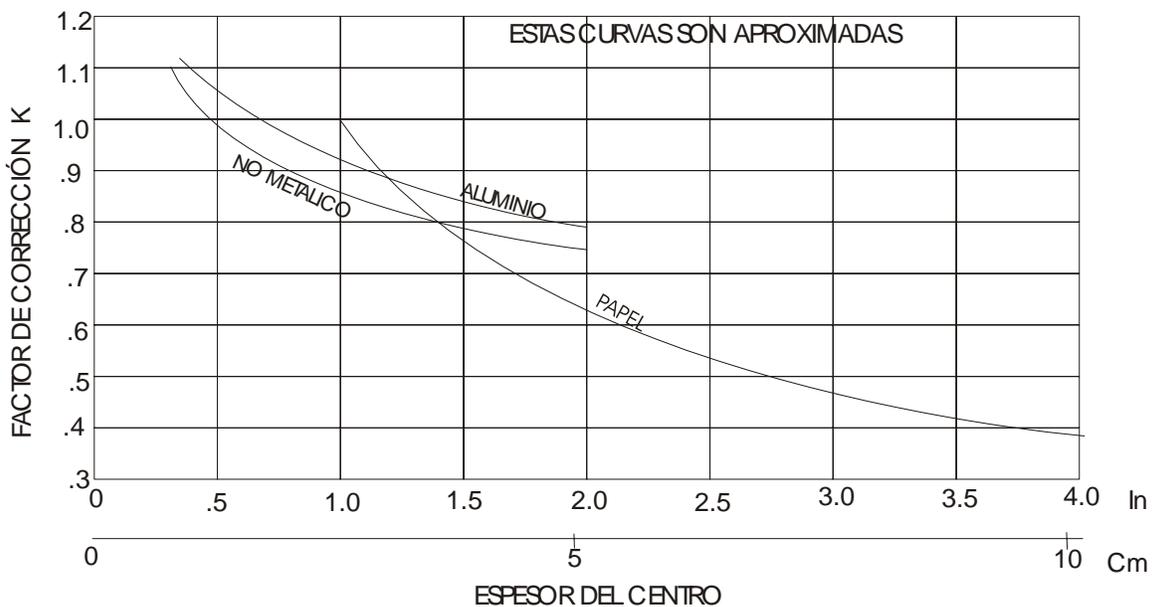


Figura II. f.- Mediciones del esfuerzo cortante con variaciones dependiendo del método de prueba, espesor del centro, espesor de las caras y otros factores. Las curvas solo pueden ser utilizadas solo como una corrección de factores preliminar. Exámenes al diseño final deben hacerse para confirmar los valores.

*Método de prueba para conocer sus propiedades.-*

Tanto el espesor como la geometría de la muestra deben ser cuidadosamente especificados y controlados para poder comparar con valores obtenidos por otros anteriormente. Valores de esfuerzos cortantes obtenidos utilizando métodos de prueba (plato cortante) Fig.II.1.4.g es muy normal que estén 25% de diferencia de los valores cuando se utiliza el método de flexión (compresión) mostrado en la figura II.1.4.h. Ambos métodos son aceptados e utilizados, y cualquier falta del entendimiento de estas diferencias pueden llevar a grandes y absurdos problemas. Esto puede observarse en las tablas anteriores de propiedades para varios honeycomb (TablasII.d,e,f,g,h,i.), especificando el método de prueba de esfuerzos.

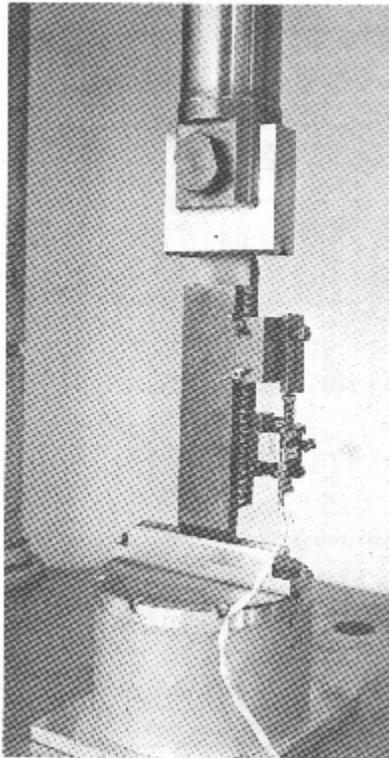


Figura II. g.- Metodo de prueba Plato cortante (plate shear)

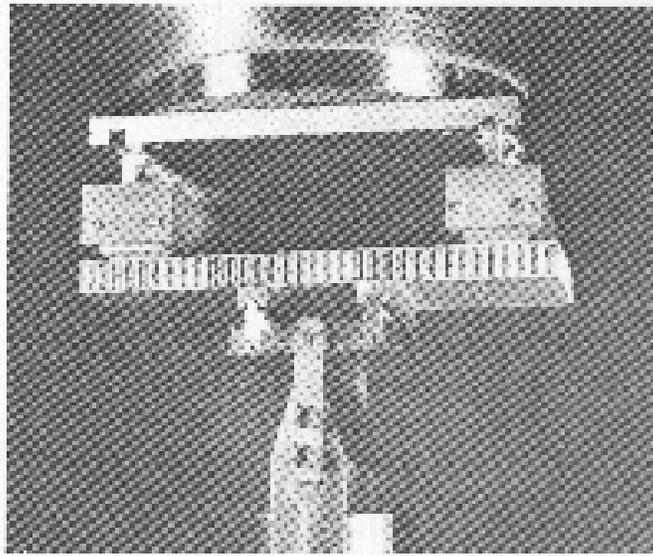


Figura II..h.- Prueba de esfuerzo cortante para una viga corta de centro honeycomb. Nota el área de presión se encuentra entre los soportes.

Como se pudo observar son varios elementos que interactúan en la creación de un material de tipo emparedado, sobre todo de centro tipo honeycomb en el cual existe una mayor diversidad de factores y detalles que deben contemplarse, y mas aún en el diseño en si del centro, que se contemplan en el capítulo siguiente.

## **CAP III.- DISEÑO DE UN EMPAREDADO**

# CAP III.- DISEÑO DE UN EMPAREDADO.

## III.I.- Requerimientos de diseño

Las estructuras tipo emparedado deben ser diseñadas conociendo los criterios básicos de una estructura listados a continuación:

1. Las caras deben de ser lo suficientemente gruesas para resistir la tensión, compresión, y esfuerzos cortantes inducidos por las cargas de diseño.
2. El centro debe ser lo suficientemente resistente para soportar los esfuerzos cortantes inducido por las cargas de diseño.
3. El centro debe de ser lo suficientemente grueso y tener un módulo de esfuerzo cortante suficiente para resistir las cargas.
4. Los módulos de compresión del centro y de las caras, deben ser suficientes para evitar el arrugamiento de las caras durante la aplicación de las cargas de diseño.
5. Las celdas del centro deben ser lo suficientemente pequeñas para prevenir el hundimiento intracelular de las caras durante la aplicación de las cargas de diseño.
6. El centro debe tener la suficiente resistencia de compresión para soportar el aplastamiento normal de las caras durante la aplicación de las cargas de diseño, o por la compresión de las caras debido a la flexión de éstas.

## Pasos de Diseño del Honeycomb:

1. *Definir las cargas.* Para cargas multipuntos, utilice las fórmulas de Roark's para esfuerzo y fatiga.
2. *Definir el tipo de viga.* Los valores de la figura III.a proveen de un simple punto de apoyo para los cálculos. Algunos cuidados o cambios en el apoyo de la viga son necesarios, cuando estas adaptaciones no son llevadas a cabo los resultados reales de flexión son mayores a los calculados.
3. *Determinar los límites de flexión.* Para las mayorías de las aplicaciones la deflexión comúnmente aceptable es hasta  $L/360$ . En algunos casos, grandes deflexiones pueden ser utilizadas, o como en el caso de esquís para nieve, grandes deflexiones son normales en el funcionamiento de la estructura.
4. *Selección del material de la superficie o acabado (caras).* La Tabla II.a. muestra los datos de caras de emparedado comunes. Dentro de las consideraciones está el peso, cargas, corrosión o aspectos decorativos, y costos. Seleccionar espesores estándares y esquinas perfiladas para iniciar los cálculos. El espesor de las caras afecta directamente tanto el esfuerzo, la superficie o acabado y la deflexión.
5. *Calcular la primera aproximación.* Después del primer espesor del emparedado  $h$ , es determinado otra selección ( $t_f$  o  $E_f$ ) que pueden establecerse para llegar a los valores mas deseables de  $h$ . La mayoría de las estructuras tipo emparedado utilizadas tienen un rango de espesores de 1.5-150 mm (0.06-6.00 in).
6. *Selección del espesor de la superficie (caras).* Tener en mente que los materiales como fibra de vidrio y aluminio son específicamente disponibles en espesores estándares. Después de seleccionar el espesor debido a su deflexión, deberá checarsé su resistencia. La formula para  $\delta_f$  es utilizada, con un factor de seguridad determinado.
7. *Selección del centro.* Calcular el esfuerzo cortante,  $\tau_{c-c}$ . Realizar una selección preliminar de los materiales listados en la Tablas II.d, II.e y II.f. Note que el esfuerzo no es el mismo en la dirección L y W. Refinar la selección, incluyendo las consideraciones de compatibilidad del material, tamaño de celdas, y tipos. Determine las correcciones necesarias debido al espesor en los efectos de esfuerzo, como se muestra en la Fig.II.f. Revisar el factor de seguridad utilizando los cálculos de los esfuerzos y los esfuerzos corregidos disponibles. Otras consideraciones incluyen choque, esfuerzos de compresión, esfuerzos cortantes, peso, y costo.

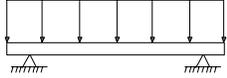
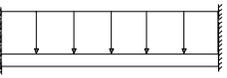
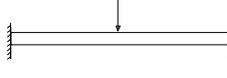
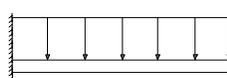
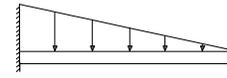
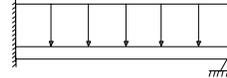
TIPO DE VIGA	MAXIMO ESFUERZO CORTANTE V	MOMENTO MAXIMO M	CONSTANTE DE FLEXIÓN $K_a$	CONSTANTE DE CORTANTE $K_s$
	$\frac{P}{2}$	$\frac{PL}{8}$	$\frac{5}{384}$	$\frac{1}{8}$
	$\frac{P}{2}$	$\frac{PL}{12}$	$\frac{1}{384}$	$\frac{1}{8}$
	$\frac{P}{2}$	$\frac{PL}{4}$	$\frac{4}{192}$	$\frac{1}{4}$
	$\frac{P}{2}$	$\frac{PL}{8}$	$\frac{1}{192}$	$\frac{1}{4}$
	P	$\frac{PL}{2}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{2}$
	P	PL	$\frac{1}{3}$	1
	P	$\frac{PL}{3}$	$\frac{1}{15}$	$\frac{1}{3}$
	$\frac{5P}{8}$	$\frac{PL}{8}$	$\frac{1}{185}$	$\frac{1}{14.2}$

Figura III.a.- Diagramas de cargas, P = carga total (**por unidad de espesor**), L = largo,  $\sigma_f$  = esfuerzo caras,  $t_f$  = espesor caras, h = distancia al centroide,  $\tau_{CS}$  = resistencia de compresión del centro,  $\lambda = (1 - \mu)^2$  propiedad de la cara,  $E_f$  = módulo de elasticidad de las caras,  $G_C$  = modulo de elasticidad del centro,  $I_W$  = momento de inercia, s = tamaño de celda (cm),  $E_C$  = modulo de elasticidad del centro en compresión, FS = factor de seguridad, T = espesor total. Tomar en cuenta que P es por unidad de espesor. Si las flexiones son críticas, se debe verificar mediante pruebas.

8. *Revisar la deflexión.* Para muchas aplicaciones, los cálculos de las deflexiones esperadas pueden omitir proporcionalmente el cálculo del esfuerzo cortante. Con un límite de deflexión muy pequeño, un espesor muy pequeño, o espacios entre apoyos pequeños, la componente cortante debe ser calculada y la selección del centro puede ser influenciado por el módulo de esfuerzo cortante requerido.
9. *Arrugamiento de caras y hundimiento intracelular.* Con superficies o caras delgadas, se puede presentar una falla local. Una revisión del  $\sigma_{f_{crit}}$  debe determinar si esto puede ser una consideración de diseño.
10. *Otras consideraciones.* Seguido, los tableros o tablas de honeycomb son soportados por los dos lados. Si la relación largo ancho es mayor 3:1, los cálculos utilizando vigas simples con espacios de soporte pequeños son muy adecuados. Utilizando las siguientes fórmulas (fórmulas de Roark) son suficientes cuando la deflexión es muy pequeña y puede ser ignorada.

$$I_{emparedado} = \frac{t_f h^2 b}{2}; \quad I_{sol} = \frac{bt^3}{12}$$

Entonces, para forma de plato:

$$I_{solid} = 6t_f h^2$$

Utilizar estas fórmulas para deflexión, pueden dar valores pequeños que los realmente experimentados, y esta deflexión puede ser importante. La tabla 88 de Roark muestra algunos múltiplos de aproximación para utilizarlos en platos cuando son soportados como se muestran.

## Fórmulas simples que pueden ser utilizadas

Esfuerzo en las caras de las vigas:

$$\sigma_f = \frac{M}{t_f h} \quad (\text{donde } M \text{ es determinado por Fig. 3.1.b.)}$$

Esfuerzo cortante del centro:

$$\tau_{cs} = \frac{V}{h} \quad (\text{donde } V \text{ es para Fig. 21-23})$$

Deflexión:

$$\Delta = \frac{K_B PL^3 2}{E_f t_f h^2} + \frac{K_S PL}{h G_C} \quad (K_B \text{ y } K_S \text{ de Fig. 21.23})$$

Para la mayoría de las vigas, el segundo término es relativamente pequeño, pero deberá ser revisado si la deflexión es crítica o el espacio entre soportes es corto.

Momento de inercia:

$$I_{sw} = \frac{t_f h^2 b}{2}$$

Hundimiento de Cara

$$\sigma_{f_{crit}} = \frac{2E_f}{\lambda} \left[ \frac{t_f}{s} \right]^2$$

Cara arrugada:

$$\sigma_{f_{crit}} 0.82 = E_f \left[ \frac{E_C t_f}{E_f t_C} \right]^{1/2}$$

Factor de seguridad:

$$FS = \frac{\text{Esfuerzo Típico o Aceptable}}{\text{Esfuerzo calculado}}$$

## Análisis estructural de casos específicos

Las siguientes anotaciones son utilizadas en el diseño de estructuras tipo emparedado.

$$D = \text{esfuerzo flexionante}; \quad D = \frac{E_f t_f h^2}{2\lambda_f}$$

$E_c$  = módulo de elasticidad del honeycomb, Pa (psi)

$E_f$  = módulo de elasticidad de las caras, Pa (psi)

$G_c$  = módulo cortante del honeycomb, Pa (psi)

$K_b$  = constante de deflexión

$K_s$  = constante de deflexión cortante.

$L$  = espacio entre soporte de la viga o alto de columna mm (in)

$b$  = espesor de la viga mm (in)

$M$  = momento máximo, kg m (lb in)

$P$  = carga, kg (lb)

$P_{cr}$  = carga crítica de columna, kg/m (lb/in)

$P_y$  = carga en cara de rendimiento kg/m (lb/in)

$V$  = máxima fuerza cortante, kg/m espesor (lb/in espesor)

$d$  = espesor total del empredado mm (in)

$h$  = distancia entre centroides de cara mm (in);  $h = t_c + t_f$

$s$  = tamaño de celda, mm (in)

$t_c$  = espesor del centro mm (in)

$t_f$  = espesor de las caras mm (in)

$w$  = carga uniforme de viga Pa (psi)

$\Delta$  = máxima deflexión de la viga, mm (in)

$\lambda_s = 1 - \mu$  = relación de Poisson del material de la cara al cuadrado =  $1 - \mu^2$

$\mu$  = relación de Poisson del material de la cara

$\sigma_f$  = máximo esfuerzo de las caras, Pa (psi)

$\sigma_y$  = campo de esfuerzos del material de las caras, Pa (psi)

$\tau_{c-c}$  = máximo esfuerzo de compresión del centro, Pa (psi)

$\tau_{cs}$  = máximo esfuerzo cortante del centro, Pa (psi)

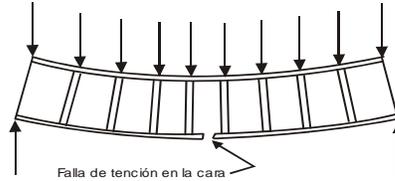
Estas formulas son sólo para honeycombs de forma de vigas y columnas, con las caras de las mismas características.

## Modos de Falla

Típicos Modos de Falla se muestran a continuación:

### Falla de la cara.

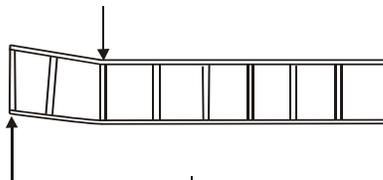
El inicio de la falla puede ser tanto en compresión como en tensión.



$$\sigma_f = \frac{M}{t_f hb}$$

### Falla de esfuerzo transversal.

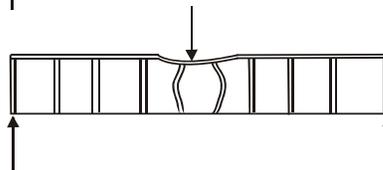
Causado por un esfuerzo cortante insuficiente del centro o el espesor.



$$\tau_c = \frac{V}{hb}$$

### Aplastamiento local del centro.

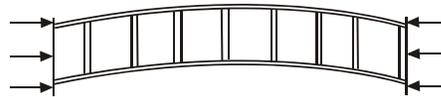
Causado por bajos esfuerzos a la compresión del centro.



$$\sigma_c = \frac{P}{A}$$

### Doblamiento general.

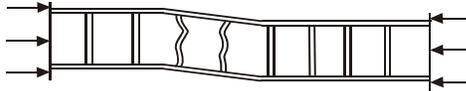
Causado por insuficiente espesor del centro o por insuficiente rigidez de este.



$$P_{cr} = \frac{K\pi^2 D}{L^2 + \frac{\pi^2 D}{t_c G_c}}$$

### Dislocamiento cortante.

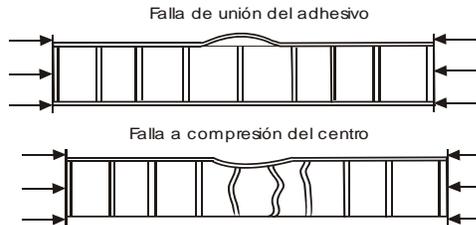
A veces ocurre lo siguiente, y como consecuencia del doblamiento. Causado por bajo módulo de esfuerzo cortante o bajo esfuerzo a cortante del adhesivo.



$$P_{cr} = t_c G_c$$

### Abultamiento de la cara.

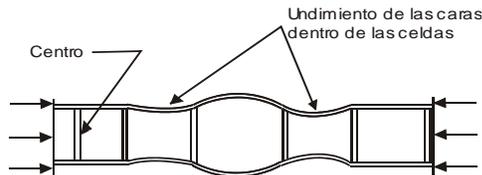
Levantamientos en las caras como vvvv. Estos pueden ser hacia dentro o fuera, depende de los esfuerzos relativos del centro en compresión y del adhesivo en tensión.



$$P_{cr} = 1.64 t_f E_f \left[ \frac{E_c t_f}{E_f t_c} \right]^{1/2}$$

### Hundimiento entre las celdas.

Aplicable solamente en centros celulares. Ocurre con muy delgadas caras. Este efecto puede causar fallas que son propagadas a través de las caras de las celdas adyacentes induciendo esto ondulaciones.



$$P_{cr} = \frac{4t_f E_f}{\lambda_f} \left[ \frac{t_f}{s} \right]^2$$

Figura 3.1.1:-Típicos modos de falla en los tableros honeycomb.

El objetivo común del diseño de un emparedado es ahorrar peso e incrementar la rigidez y utilizar la menor cantidad de un material superficialmente caro. Algunas veces otros objetivos, como reducir el costo de unión (sobre todo en formas aerodinámicas), reducción del ruido reflejado e incrementar la durabilidad, están también involucrados. Los problemas de cálculos en el diseño, bajo los que está sometido son relativamente pocos, como la obtención de las cargas por dentro, por fuera, y la vinculación o unión de la transmisión de las cargas a los miembros, bajo las restricciones de deflexión, perfilados, peso, y costo. A continuación mencionamos unas sugerencias.

1. *Método y secuencia de fabricación.* El costo de una estructura tipo emparedado, está fundamentalmente establecido de la etapa de diseño, y una considerable diferencia en costo resulta de soluciones alternativas para los problemas de diseño. Los detalles de dos tipos de borde cerrados por fuera "close-out" se muestran en la Fig III.b, llevado a cabo esencialmente para un mismo trabajo con el mismo peso. Dejando un espacio libre en los bordes para posicionar las patas en la zanja de entre caras exteriores o interiores ahorra el costo del corte de relieves del centro y es muy difícil pasarlo entre los materiales del centro y del adhesivo que quedan en la zanja. Otra alternativa, que es de bajo costo, son arreglos diferentes en las esquinas que se muestran en la figura III.c. y también tratamientos de bordes adicionales, conexiones, y esquinas, se utilizan comúnmente.



Figura III.b.- La esquina cerrada (derecha) utiliza un canal el cual es bueno, pero requiere de una máquina que corte el fondo, base del centro y el adhesivo durante el ensamble. La alternativa izquierda puede ser mucho mejor.

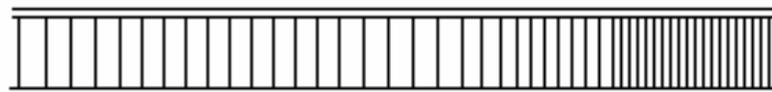


Figura III.c.- Tratamiento de aumento de la densidad en la esquina.

2. *Utilización del centro adecuado.* Varias densidades de centro pueden ser utilizadas para un mismo cuadro o estructura, cada carga debe ser llevada a toda el área de la unión del adhesivo y sus vecinos, como se muestra en la Figura III.d. Sin embargo en muchos casos, el peso ahorrado en áreas de baja densidad es aumentado con el peso del adhesivo utilizado. Empalmes o uniones de centros como estos son mostrados en la Figura III.e B ó C, que han sido utilizados para producir estructuras de matrices abatibles para grandes protecciones de calor, pero se vuelve costoso para la producción de uniones de mas de unas cuantas pulgadas de largo.

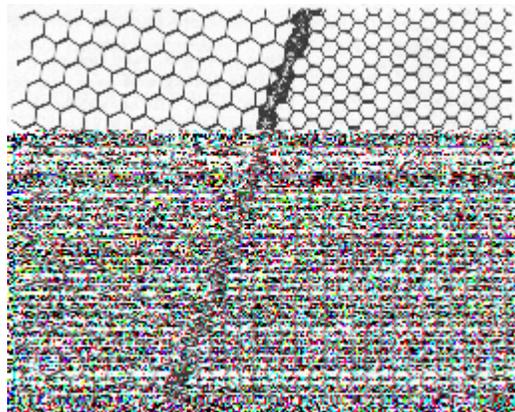


Figura III.d.- Típica unión de centro utilizando cinta de espuma adhesiva de dos centros de diferentes densidades. Requiere que los centros sean sostenidos durante el pegado.

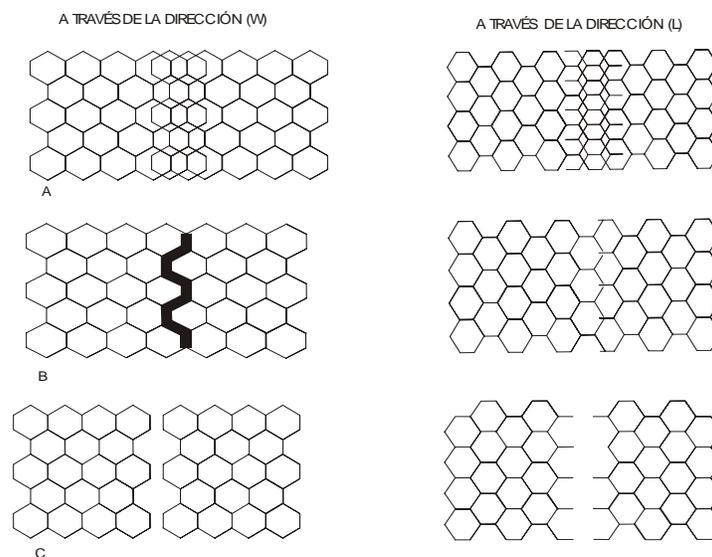


Figura III.e.- La unión A puede ser formada por simple aplastamiento dentro de la sección de unión. Este método funcionara con solo algunos centros de aluminio. Uniones B y C requieren de una perfecta sincronización de las celdas.

3. *No utilizar varios métodos de unión en una misma estructura.* Pueden incluirse algunos ajustes en las uniones de emparedado, soldadas por calentamiento, remachadas, y pueden ser por si solas ensambles de unión. Adhesivos disponibles permiten una unión secundaria para ser desarrollada a temperaturas de 16°C (60°F) hasta arriba de 177°C (350°F) sin degradarse la integridad de las uniones sub-ensambladas.
  
4. *Uso de tornillos y remaches para transmitir cargas (no 100% confiables).* Donde el espacio no es disponible para uniones progresivas o áreas anchas de sobre capas para llevar altas cargas, la adición de remaches o tornillos es la única solución. Sin embargo su uso resulta comúnmente en que la vida de fatiga de la estructura disminuya, en adición de un incremento de su peso. El uso de remaches para el único propósito de apariencia es particularmente evitado, ya que ello frustra mucho de las ventajas de su uso en la unión de las estructuras.
  
5. *Uso de dobles caras sólo donde se necesitan, en lugar de una cara pesada sobre toda la estructura.* El uso de dobles caras, aunque aumenta el costo de mano de obra, mejora la calidad de la parte. En el caso donde las caras son formadas por fibra de vidrio o grafito prepreg, el reforzamiento es muy sencillo, ya que capas extras pueden ser adheridas para transmitir cargas mayores exactamente donde es necesario.
  
6. *Mayor utilización de las capas dobles externas que las capas dobles internas.* El uso de la doble capa interna, significa que el corte de relieve se hará en el centro, para prevenir la formación de un puente o una área sin unión en la parte final de la capa. En la Fig.III.f, muestra una estructura donde las cargas pueden ser reforzadas en la parte final de la estructura. Los detalles de diseño de la manufactura (parte final derecha), puede ser sustancialmente mas costosa que la parte final izquierda. La figura III.g. muestra la misma estructura con ambas terminaciones, producidas a un bajo costo, obteniéndose caras de baja protección en un lado. En el caso de algunos materiales para caras de aluminio de 0.25mm (0.010in), o mayores espesores de fibra de vidrio o paño de grafito, son factibles para utilizar como capas dobles sin corte de relieves de centros, debido a que el hueco causado por el punteo, es suficientemente pequeño para ser llenado con el adhesivo. En ocasiones una capa extra de una película de adhesivo es adherida para ayudar. Un ejemplo de un método doble capa de unión se muestra en la Fig III.h.

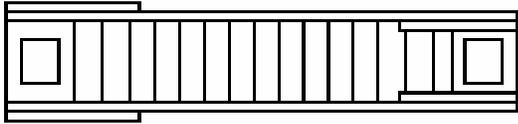


Figura III.f.- Reforzador doble interno y externo.

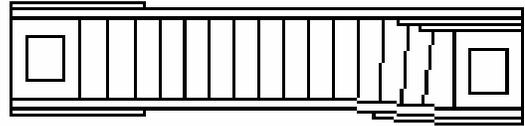


Figura III.g.- Reforzamiento doble de bajo costo



Figura III.h.- Doble capas de unión.

### III.II.- Diseño de la forma y tamaño de las celdas.

El número de combinaciones de formas y tamaños de celdas honeycomb, puede ser ilimitadas (Figuras III.i. y Figura III.j.). En la práctica, la forma de la celda es seleccionada primero debido a su facilidad de fabricación. Para el punto de vista de unión, es deseable utilizar centros a los cuales se les puede poner o adaptar en superficies con cualquier tipo de curvaturas, sin distorsión de las formas de las celdas o su fractura. Sin embargo la configuración de dichas celdas es tan complicada, que resultan serias dificultades en el proceso de fabricación y de la necesidad del desarrollo de *equipo especializado*. Debido a esto, tres tipos de honeycomb han sido desarrollados: estructuras planas, curvaturas simples y doble curvatura.

Una representación clásica del primer tipo de honey-comb son las celdas hexagonales (fig. III.i).

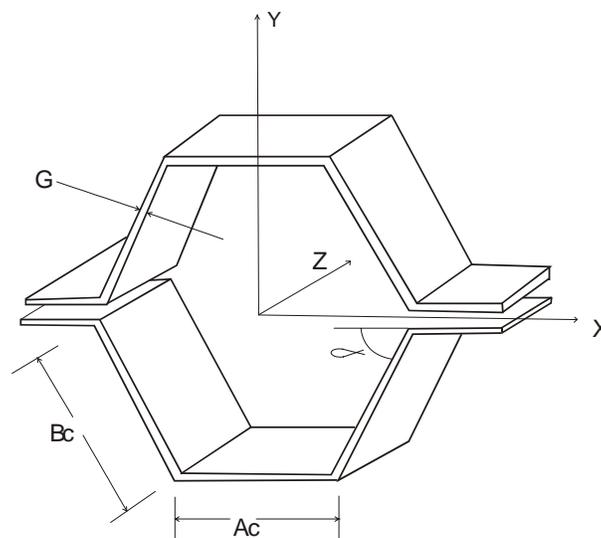


Figura 3.2.1.- Celda hexagonal honeycomb:  $A_c$ , largo del lado de unión;  $B_c$ , largo del lado solitario;  $G$ , espesor;  $\alpha$ , ángulo de unión ;  $x$  dirección perpendicular al eje de la celda y dirección de expansión;  $y$ , dirección de expansión ;  $z$ , dirección del eje de la celda. En celdas hexagonales  $A_c=B_c$ , y  $\alpha =60^\circ$ .

Este tipo de celda, es ampliamente utilizada debido a su proceso de producción relativamente simple, un alto rango de estructuras planas o estructuras con pequeñas curvaturas que son disponibles. Honeycomb con celdas hexagonales bajo-expansión ( $\alpha <60^\circ$ , pero  $A_c = B_c$ ; Fig. III.j.A) y celdas hexagonales irregulares ( $A_c > B_c$ ; Fig. III.j.B) pertenecen a este tipo. Centros Honeycombs con celdas de este tipo de configuraciones soportan grandes

esfuerzos cortantes y altos esfuerzos de compresión en la dirección x. Pero son pesados, tienen menos estabilidad y soportan menos esfuerzos en la dirección y, comparado con los centros con celdas hexagonales regulares.

Cálculos teóricos y estudios experimentales de la densidad, esfuerzos cortantes y esfuerzos de compresión del honeycomb con celdas irregulares hexagonales, muestran ser mucho menores, que los honeycomb con celdas hexagonales regulares.

Honeycombs con celdas hexagonales reforzadas (Fig. III.C) y celdas triangulares reforzadas (Fig. III.D) son rígidos, tienen 1.5 y 2 veces más resistencia de compresión respectivamente, pero su densidad es proporcionalmente mayor que los centros de celdas hexagonales regulares. La resistencia al esfuerzo cortante de los honeycombs hexagonales reforzados es 1.5 veces mayores en la dirección x, pero es lo mismo en la dirección y, en comparación con el esfuerzo de celdas hexagonales regulares. El esfuerzo cortante de celdas triangulares es 2 veces mayor en las direcciones X y Y.

La principal desventaja de estos honeycombs es su incapacidad de ponerlos en superficies complejas, pero en algunos casos, esto lleva a otro procedimiento de fabricación de partes con formas y dimensiones predeterminadas, fuera del bloque del honeycomb, por ejemplo procesos de moldeado. Sin embargo, esto involucra complicaciones significantes en los procesos de manufactura, incrementando su mano de obra y reduce las capacidades de esfuerzo de las estructuras.

El segundo tipo de centros honeycomb incluyen celdas-cuadradas (Figs.III.j.E,F) y celdas romboédricas (Fig. III.j.G) donde  $A_c=B_c$ . Estos son realmente utilizados en estructuras con curvaturas insignificantes. Centros de celdas rectangulares ( $A_c < B_c$ ) (Fig. III.j.H) no requieren grandes esfuerzos para colocarlos sobre superficies cilíndricas, o por ejemplo en superficies de curvatura simple. La densidad de estos centros es 1.3 veces mayor que la densidad de centros hexagonales regulares; el esfuerzo cortante en la dirección x es 1.5 veces menor, y en la dirección y es 1.5 veces mayor.

Centros Honeycomb utilizados para estructuras emparedado de doble-curvatura, pueden tener celdas de la siguiente geometría: tipo ondulado flexible, tipo corrugado de enlace, celdas regulares hexagonales con cambios de los elementos (un defasamiento), y celdas hexagonales con paredes corrugadas (Figs. III.j.J,K,L respectivamente).

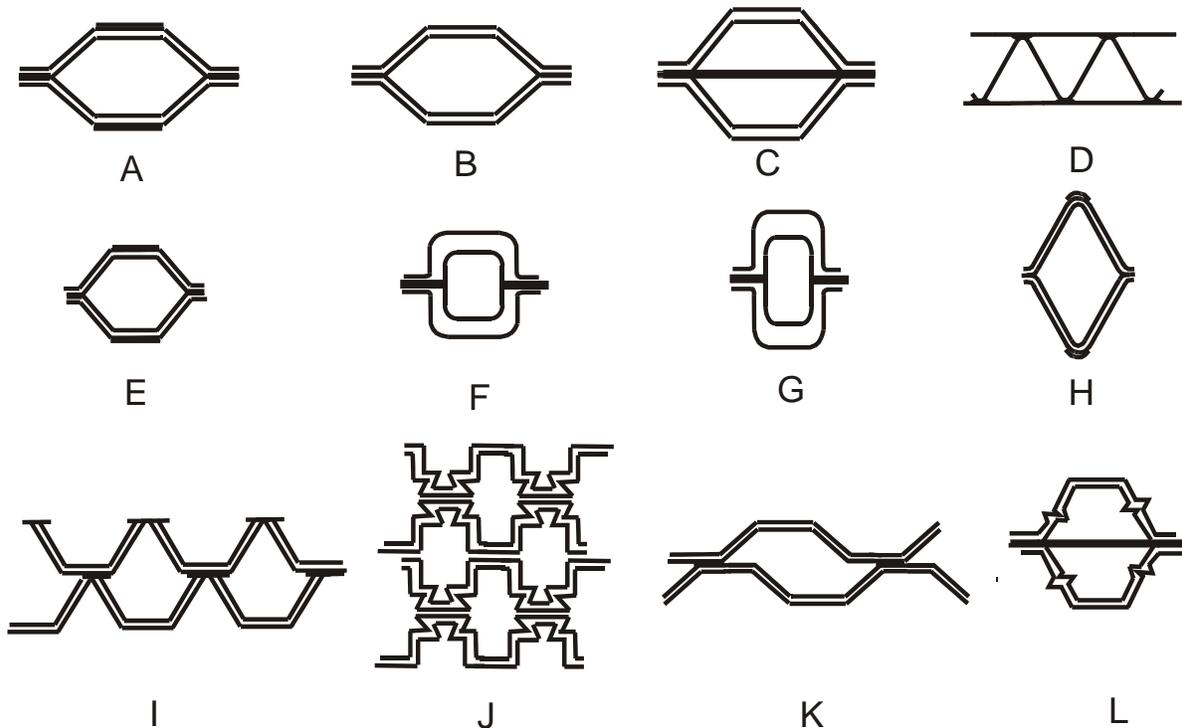


Figura III.j.- Celdas Honeycomb: (a) expandidas; (b) hexagonos irregulares; (c) hexagonales con elemento reforzador; (d) triedro; (e,f) cuadrados; (g) rombos; (h) rectangulares; (i) tipo flexible; (j) corrugado de enlace; (k) hexagonal con desfasamiento; (l) hexagonal con paredes corrugadas.

Como mencionamos anteriormente, las dimensiones de las celdas (pared: altura y espesor) son determinadas por una configuración específica de la celda, debida a los requerimientos de la estructura del honeycomb. La altura de la pared, incrementa su densidad y, consecuentemente, la resistencia del centro.

Mejoras en las propiedades de esfuerzo pueden ser logradas incrementando el espesor de la pared manteniendo la configuración de la celda. Papel de grandes espesores es utilizado para este propósito, el cual incrementa la densidad y su resistencia. De esta manera, si el papel BFSK con espesores de  $60 \mu m$ , es reemplazado por papel de espesor de  $145 \mu m$  con una pared de 2.5mm, la resistencia a la compresión del centro honeycomb mejora de 1.10 MPa. a 4.5MPa, y su densidad de 45 a  $100 \text{ kg/m}^3$ .

Dentro del diseño de las celdas, es importante tener en cuenta ciertos factores, sobre todo si el uso de este será en condiciones demandantes o en circunstancias diferentes a lo tradicional, que deben ser tomadas en cuenta debido al medio de trabajo de este.

Cuando nuestro tablero esta en condiciones de altas temperaturas o en el caso de que sea utilizado en el espacio, se debe tener en cuenta que dentro de las celdas se encuentra atrapado aire, el cual al calentarse amentará de volumen provocando levantamientos, deformaciones y esfuerzos innecesarios. De igual forma los tableros realizados para naves espaciales al estar en el espacio debido al vacío, el aire atrapado tenderá a escapar provocando una acumulación de esfuerzos, deformaciones, empañando espejos, daños a circuitos, etc.

Estos factores deben ser tomados en cuenta en el diseño de las celdas y para evitar esto, se realizan canales o ventanas por los cuales se le da salida sin que cause daño alguno.

Estos agujeros de ventilación, pueden ser taladrados en el centro o troquelados en la parte superior de las paredes de las celdas según sea el caso.

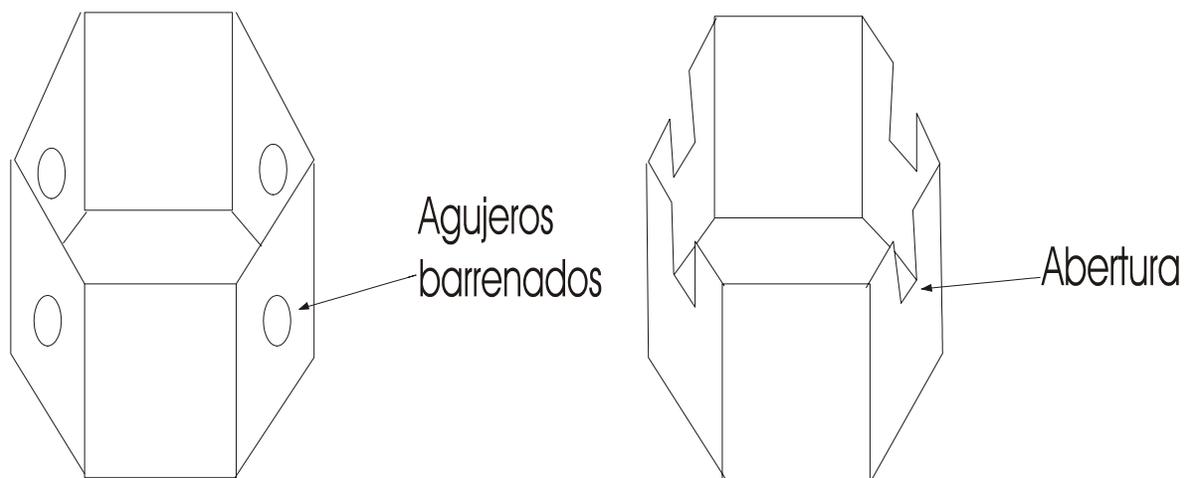


Figura III.k.- Centros honeycomb ventilado.

### III.III.- Métodos de Prueba.

Los métodos de prueba de honeycomb son muy sencillos, como en todos los métodos, son los simples parámetros los que se deben estandarizar para que exista una congruencia entre los resultados obtenidos y puedan ser fácilmente reproducidos, por lo que cualquier idea puede ser utilizada como método de prueba, sin olvidar todos los parámetros y especificaciones.

Estas pruebas han sido establecidas y especificadas por diferentes productores o manufactureras, como los “Servicios de adquisición, procuración y regulación de la defensa de Estados Unidos”, recopiladas por el departamento de defensa; caracterizándolas en especificaciones federales, militares e industriales.

La mayoría de las especificaciones pueden ser encontradas en el Departamento de Defensa de E.U., publicado por La sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM) y la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE).

A continuación se citan algunos de éstos métodos:

**MIL-C-7438F Material de centro**, Aluminio (preparado por el centro de ingeniería naval). Consiste en poner un panel de dimensiones, puntos de apoyo, características y posiciones establecidas, para determinar tanto la deformación así como las propiedades de este, como se muestra en la figura III.I.

Aleaciones 5052, 5056 y 2024. Rangos de caras de 0.02 a 0.15 mm (0.0007 a 0.006 in). Tamaños de celda de 4 a 9.5 mm (5/32 a 3/8 in) y densidades de 0.016 a 0.192  $g/cm^3$ , corresponden a esfuerzos de compresión de 138kPa a 15.65MPa. (20 a 2270 psi)., esfuerzos cortantes longitudinales de 221kPa a 9.48Mpa. (32 a 1375 psi) y transversales de 138kPa a 5.65MPa (20 a 820 psi).

En estas pruebas se debe describir la densidad del centro, tamaño de celda, tiro de la celda, espesor, etc.

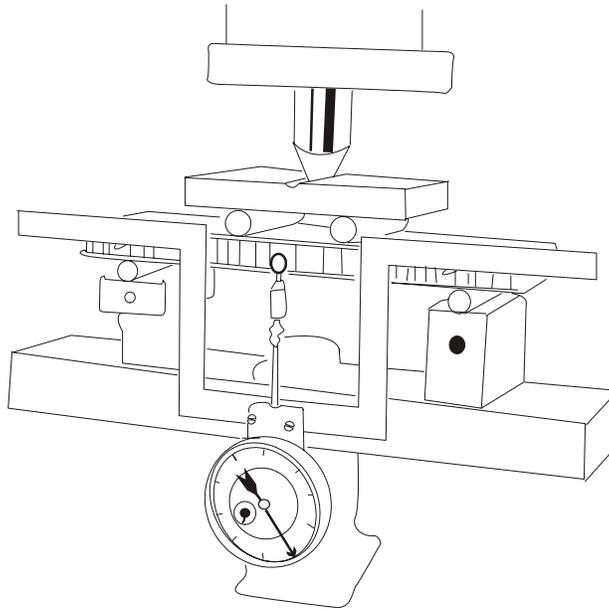


Figura III.1.- MIL – STD flexion del honeycomb

Las dimensiones y características de este método se señalan en siguiente figura

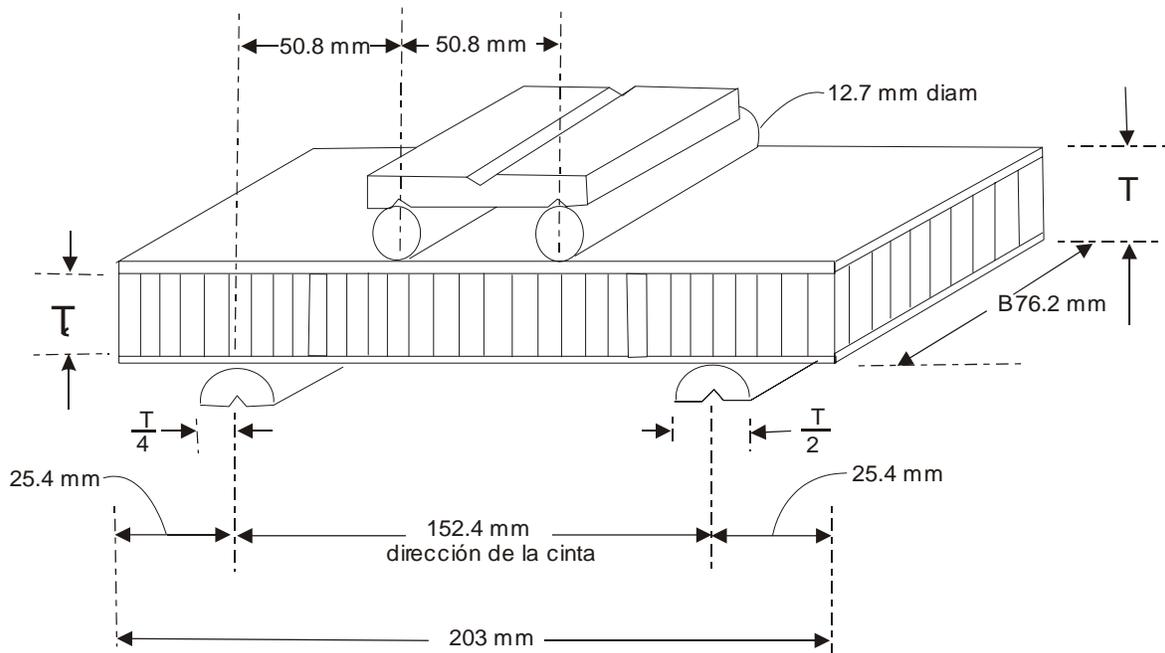


Figura III.m.-Prueba de esfuerzo tipo viga, con las diferentes tolerancias. Plato de presión de 25.4x76.2x6.4 mm con ranuras de alineación. Las barras de carga tienen un radio de 1.5mm y los puntos de apoya un radio de 12.7mm

Este método incluye dos grados y una clase de material: Grado B- para exposiciones de 177°C (350°F), Grado C- para exposiciones de 221°C (430°F), y Clase 2-tratado (tratamiento superficial de protección a la corrosión).

**MIL-A-2546B Material Adhesivo. “Elevación del Barril”.** Estas especificaciones abarcan adhesivos para la unión de las caras de metal a centros de metal, para usos estructurales primarios y secundarios de partes aeronáuticas, que serán expuestos a temperaturas de 260°C (500°F). También se ha intentado unirlo con otros diferentes materiales, algunas especificaciones de pruebas se han realizado con diferentes combinaciones de interés. Los valores de las pruebas son obtenidos con centros y caras de aluminio.

Se tienen cuatro diferentes condiciones de prueba de I a IV (variando el tiempo de exposición a diferentes temperaturas) y tres clases de unión , 1-3 (unión de caras de metal con diferentes componentes). En los resultados de la prueba se contemplan características de trabajo incluyendo parámetros de aplicación y curación, vida de almacenamiento, propiedades mecánicas y factores de seguridad. (Fig.III.n.).

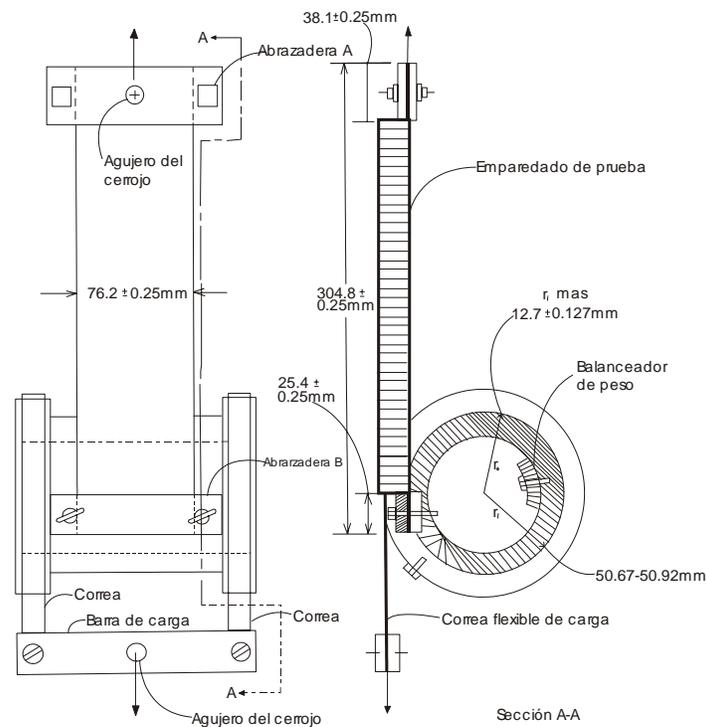


Figura III.n.- Aparato de prueba de elevación de barril. No dimensionado completamente.  $r_i$  : radio del barril de contacto con la cara;  $r_0$  : radio de la correa de carga.

**AMS-3688 A. Adhesión o unión de centros.** Estos parámetros involucran temperaturas de curación, base de resina en pasta o en forma de hoja, temperaturas de curación nominal de 121°C.

Son probados uniones de centros de aluminio y no metálicos con llenado de huecos. Contiene los requerimientos de vida útil, propiedades de curación, densidad y resistencia al esfuerzo cortante, calidad, tolerancias dimensionales y factores de seguridad.

Esta prueba es igual a la MIL-C-7438F, para material de centro, pero hay que tener en cuenta la ubicación de las uniones como se muestra en la figura III.o.

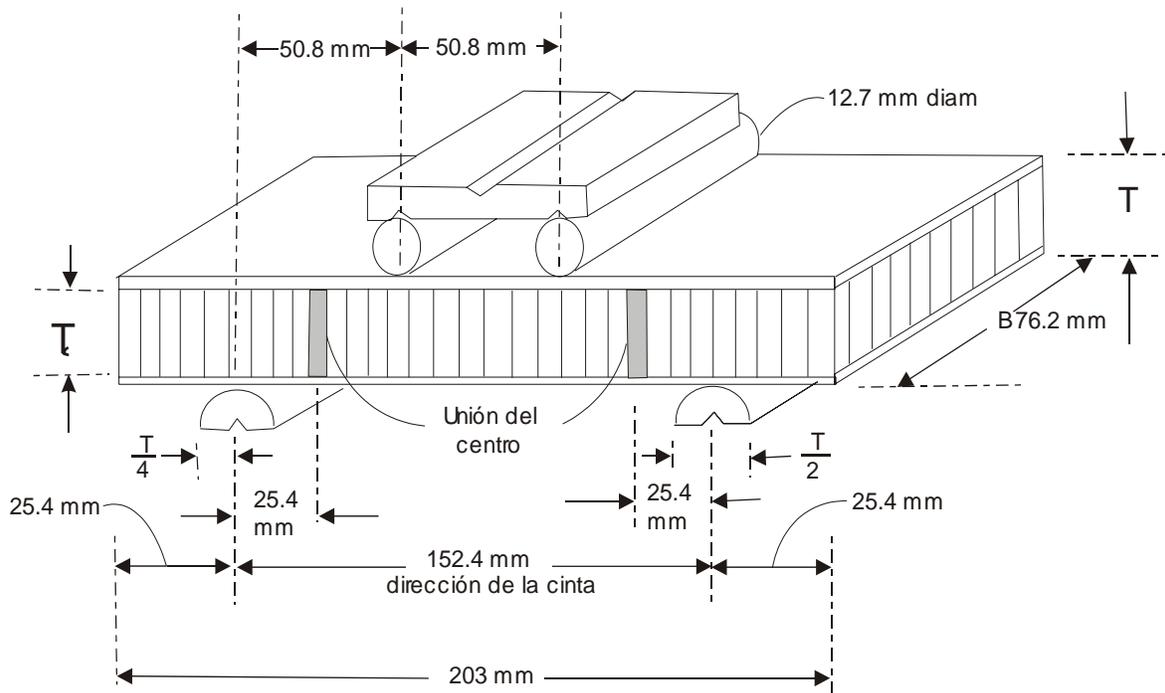


Figura III.o.- Prueba tipo viga para uniones de centros honeycomb. Es importante la ubicación de las uniones así como las posiciones señaladas.

Dentro de estos métodos, señalamos algunas equivalencias en las diferentes publicaciones ASTM, así como la figura que muestra la forma de elaborarlos:

- \*Densidad y centro de gravedad del centro (ASTM C 271).
- \*Absorción de humedad del centro (ASTM C 272).
- \*Conductividad térmica del centro (ASTM C 177)
- \*Tensión del centro.
- \*Resistencia al agua.
- \*Compresión del emparedado.
- \*Tensión del emparedado (ASTM C 297).
- \*Flexión del emparedado (ASTM C 393)
- \*Conductividad térmica del emparedado ASTM C 236).
- \*Desprendimiento de las caras del emparedado (ASTM D 1781).
- \*Esfuerzo de compresión del centro (ASTM C 365), perpendicular y paralelo (fig.III.p.)

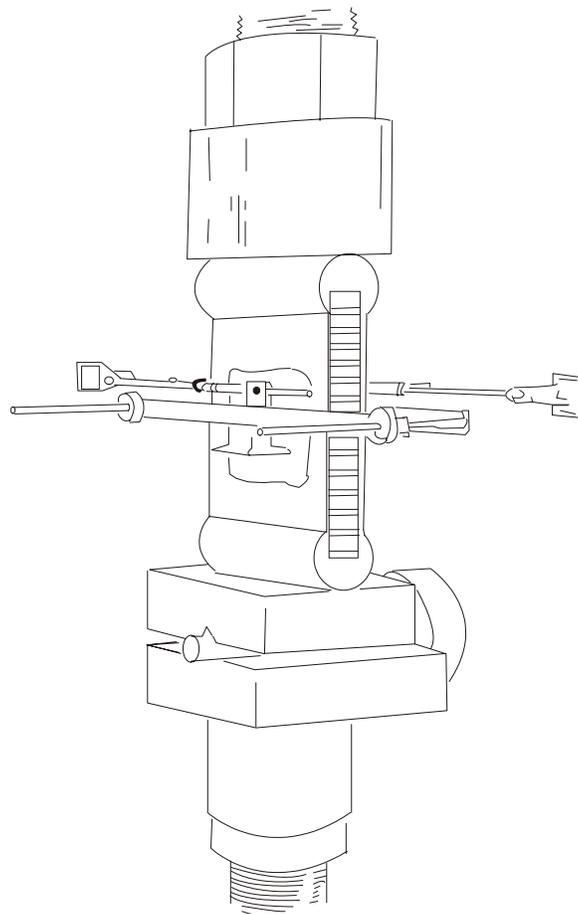


Figura III.p.-Prueba de compresión en dirección perpendicular, que tiene en la parte media un instrumento de medición, para observar el ensanchamiento esperado en esa zona.

- \*Esfuerzo cortante del centro (ASTM C 273) (Fig. III.q)
- \*Esfuerzo cortante del emparedado (Fig.III.q).

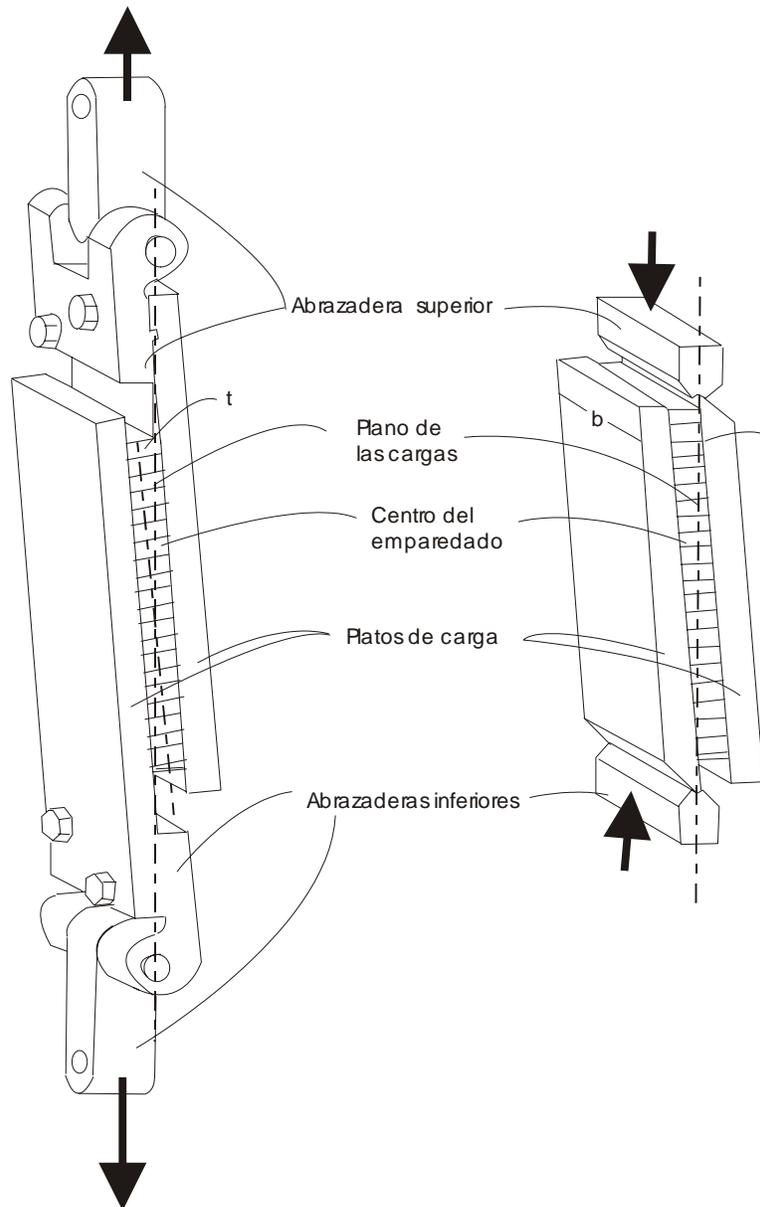


Figura III.q.- Prueba de esfuerzo cortante en dirección perpendicular, con un pequeño ángulo para que se refleje o concentre en el centro del honeycomb.

\*Delimitación o estirado de los nodos (Fig.III.r.).

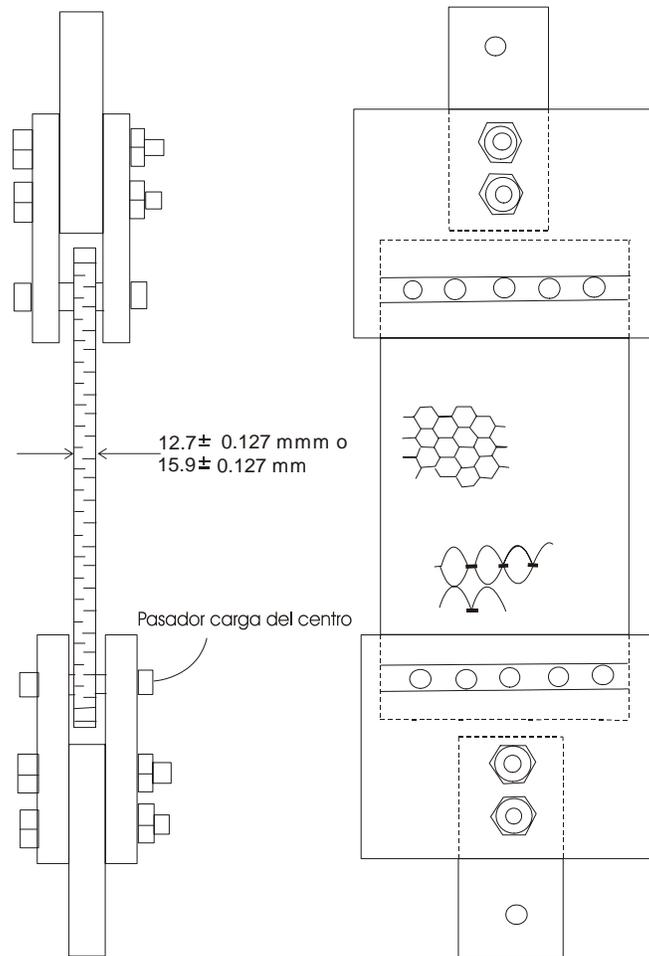


Figura III.r.- Prueba de estiramiento de los nodos.

La mayoría de los métodos de prueba son para la adhesión o unión de las caras con el centro, o de la unión entre centros, así como en menor número para las propiedades de los centros.

También hay que tomar en cuenta que existen otras pruebas como son de conductividad térmica, eléctrica, olores, etc, dependiendo de las necesidades del diseñador.

Todos estos factores de diseño de un panal honeycomb que se han señalado en los capítulos anteriores, deben estar contemplados en los procesos realizados por la máquinas de elaboración de este material y por ende tiene una gran influencia en el diseño de estas máquinas, el cual se verá en los siguientes capítulos.

## **CAP IV.- PROCESO DE FABRICACIÓN.**

# CAP IV.- PROCESOS DE FABRICACIÓN.

Dentro de los procesos de elaboración de estructuras de tipo honeycomb, existen sólo unos cuantos que cambian en algunas etapas de su procesos, los cuales mencionaremos a continuación:

IV.I.- Manufactura de centros de papel honeycomb, por el método de *perfilado* “profiling”, y sus variantes:

- Perfilado por molde
- Perfilado por engrane (papel no impregnado)
- Método corrugado
- Unión por barras rectangulares
- Unión por perfiladas y plato de pres-uni6n

IV.II.- Método de expansi6n y sus variantes:

- Camaras de secado
- Bloque de laminas de espesores deseados
- Combinaciones

IV.III.- Maquinas de expansi6n.

#### IV.1.- Manufactura de centros de papel honeycomb, por el método de perfilado “profiling”.

El método de perfilado es utilizado en la manufactura de honeycombs de papel delgado impregnado o sin impregnar (fig. 4. 1.1). Los dos lados del papel son llevados en una máquina especial de impregnación (fig.4.1.1a), el papel es llevado con cierta velocidad a través de un baño de pegamento. La velocidad en la que es llevado determina la aplicación del pegamento sobre el papel. Para una aplicación estable del pegamento, el papel es impregnado entre unos rodillos. Entonces el papel impregnado pasa a través de una cámara vertical de secado dentro de la máquina de impregnación, donde cada paso de la cámara tiene tres zonas con determinadas temperaturas.

El prepreg es enrollado en un carrete y posteriormente cortado en preformas (fig 4.1.1.b). La preforma prepreg es puesta en una prensa precalentada con el perfil deseado (fig.4.1.1.c). Para evitar rompimiento del papel por el golpeo del perfilado, primero se debe enrollar hacia abajo o en sentido contrario la superficie de trabajo, y posteriormente puede ser presionada. Como una variante es posible realizar una línea de prensado sin necesidad de cortar la láminas de preforma.

Después de una corta exposición, la prensa es levantada y la preforma perfilada es removida de la matriz. Así el número necesario de preformas es fabricada. En las superficies de las preformas, las que deben ser pegadas, se les aplica tiras de adhesivo con la ayuda de unos rodillos de aplicación y sacado del adhesivo (fig.4.1.1.d). Antes del ensamblado, una segunda capa de adhesivo es aplicada en las tiras secas de adhesivo, esta segunda capa es secada para obtener una mayor rigidez de unión. Las hojas son puestas en una secuencia la cual, las superficies de unión de las continuas preformas sean alineadas en las que se forman las configuraciones deseadas entre ellas.

Para evitar resbalamiento o un desfaseamiento entre las preformas durante el ensamblado, antes de colocar la siguiente preforma son puestas barras con la configuración de las celdas en las cavidades de la preforma (fig.4.1.1.e). Después de alinear y arreglar la siguiente preforma, las barras se quitan y son puestas en las cavidades de la siguiente preforma. El ensamble es llevado hasta la altura necesaria.

Al ensamble se le pone encima una tabla, el peso de esta depende del tamaño de la celda, y son puestos en una cámara preliminar de secado, donde se le suministra aire por medio de un ventilador para que pase a través de los canales del bloque de honeycomb, removiendo el solvente de las tiras de adhesivo a una cierta temperatura y posteriormente la tabla es removida (fig.4.1.1.f). Después de una completa curación, el bloque es llevado a una temperatura no mayor de 50°C fuera del termostato. Posteriormente es cortado al espesor requerido.

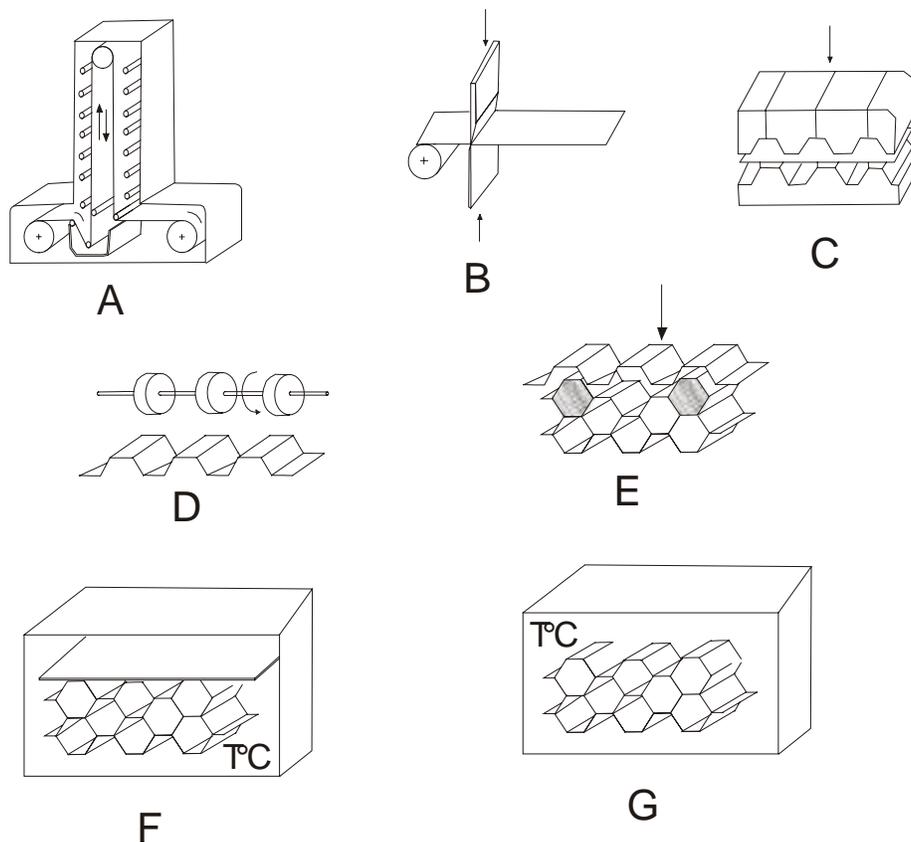


Figura 4.1.1.- Unión de bloques honeycomb hechos por papel impregnado: (a) impregnación del papel y secado; (b) corte del prepreg en preformas; (c) perfilado de la hoja prepreg; (d) aplicación y secado de la tira de adhesivo; (e) ensamble de las preformas dentro de un bloque; (f) unión de las performas; (g) curación de pegado.

Variantes en la tecnología de este esquema, se incluyen en los métodos de unión de las preformas prepreg y del calor de unión. Una primera variante (fig.4.1.2), la preforma es puesta en barras de la primera hilera, las barras de la segunda hilera son puestas encima de la primera preforma, y la segunda preforma es puesta sobre estas barras. La unión es lograda por medio de las extensiones de un plato de compresión las cuales son precalentadas.

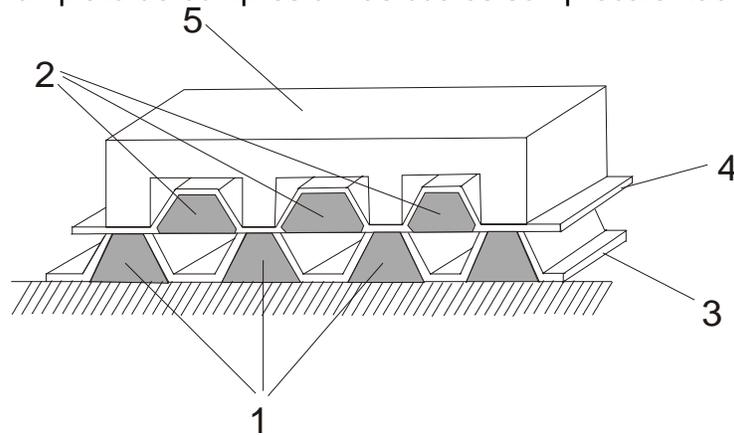


Figura 4.1.2.- Otra manera de unión de las hojas perfiladas prepreg: 1, primer fila de barras; 2, segunda fila de barras; 3,4, hojas prepreg; 5, plato de unión.

Una segunda variante (fig.4.1.3) un bloque de preformas es ensamblado, y barras de sección rectangular son puestas dentro de las celdas del bloque. El bloque es puesto dentro de un horno, donde el pegamento del prepreg es curado a través de las líneas de unión de las preformas.

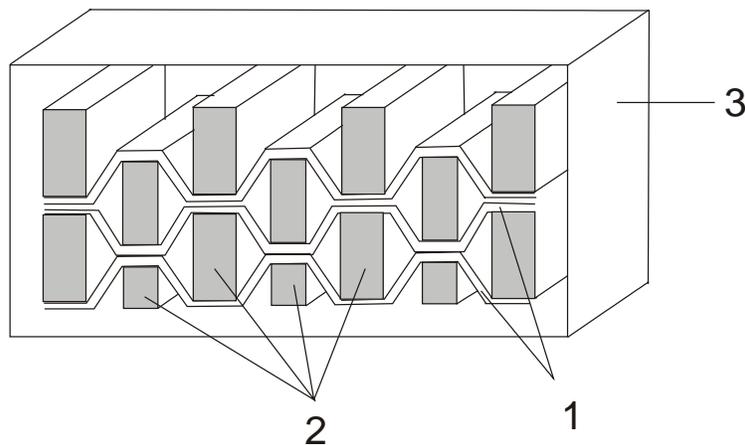


Figura 4.1.3.- Bloque de unión de hojas perfiladas prepreg: 1, bloque preformas prepreg; 2, barras de sección rectangular; 3, horno.

El perfilado de papel no impregnado (no existe una etapa de impregnación fig.4.1.4), es utilizado primordialmente para papeles delgados con una capa o cubierta polimérica, en la fabricación de centros de celdas hexagonales. A este se le asocia un incremento en la capacidad de torcimiento debido al espesor del papel, lo cual es característico de una geometría inestable de la preforma y también un sustancial agrietamiento de la capa polimérica de estas hojas.

Antes del perfilamiento, el papel es secado a través de ejes de la máquina; entonces es cortado por una guillotina a las hojas de tamaño requerido (fig 4.1.4.a). Posteriormente, la primera hoja de papel seco es puesta sobre las barras de la primera hilera en un dispositivo especial. Las hileras comprenden de un número de barras paralelas de sección de medio hexágono las cuales están coordinadas en su lugar correspondiente para el tipo de estructura requerida. El perfil de las barras corresponde al tamaño de las celdas del honeycomb. Para rigidez la hilera es arreglada por medio de sujetadores en un armazón de la máquina.

Un engrane giratorio calentado con el perfil deseado empuja hacia las barras a la hoja de papel (fig.4.1.4.b). Los rodillos aplican tiras de pegamento a las superficies de unión de la hoja perfilada (fig.4.1.4.c). En la segunda línea de barras se cambia el armazón para el debido desfaseamiento relativo a la primera hilera de barras y posteriormente se pone encima la siguiente hoja de papel. La segunda hoja de papel es perfilada por el engrane (fig.4.1.4.d) y posteriormente, por medio de un plato precalentado con una superficie del perfil pre-presiona el contacto con la primera hoja, a través de la superficie de contacto en las cintas de unión (fig.4.1.4.e). El perfil corresponde al de la hoja corrugada. El tiempo de pre-presión y la temperatura del plato dependen del tipo de adhesivo utilizado.

El plato es removido de la hoja pre-presionada, las barras de la primera hoja son puestas arriba de la segunda hoja, para poder perfilar la tercera hoja. En las superficies de unión de la segunda hoja se le aplican las cintas de adhesivo (fig. 4. 1.4.f). La tercera hoja seca, es puesta junto con las barras y es perfilada (fig.4.1.4.g), las siguientes operaciones son repeticiones de los pasos anteriores.

El proceso se repite hasta el tamaño requerido del bloque. Para complementar la unión de las hojas se utiliza un horno, equipado con ventilación para remover los productos volátiles de la polimerización de las tiras de adhesivo.

Los bloques unidos se impregnan en un baño con el requerido pegamento (una resina) o por un flujo homogéneo de pegamento dentro del bloque. Después de la impregnación, el bloque es puesto en una cacerola, los ductos de las celdas son puestos verticalmente, y esto mantiene fuera el exceso de pegamento para las paredes del bloque.

Para lograr una mejor remoción de los productos volátiles de la polimerización y para producir un bloque de alta calidad con buenas propiedades de resistencia, este es tratado en un horno ventilado en el cual el bloque es colocado de tal forma que los ductos de las celdas sean paralelos al flujo del aire.

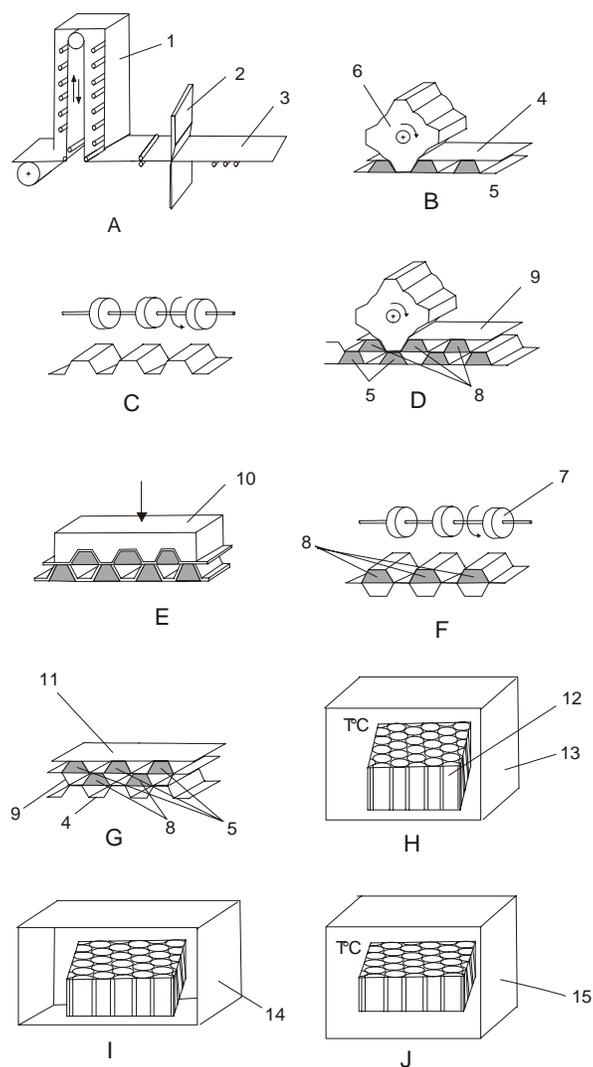


Figura 4.1.4.- unión de bloques honeycomb hechos de hojas de papel no impregnado: (a) secado y corte de papel; (b) perfilado de la primera hoja; (c) aplicación de las tiras de adhesivo a la primera hoja; (d) perfilado de la segunda hoja; (e) unión preliminar de las dos hojas; (f) aplicación de las tiras de pegamento a la segunda hoja; (g) aplicación de las siguientes hojas y su repetición de (d) – (f); (h9 unión final del bloque; (i) impregnación del bloque; (j) cura y secado del pegamento en el bloque; 1, cámara de secado; 2, guillotina; 3, hoja de papel; 4, primera preforma; 5, barras del primer panal; 6, rollo perfilado; 7, rodillos; 8, barras del segundo panal; 9, segunda preforma; 10, plato calentado; 11, tercera preforma; 12, bloque honeycomb; 13, 15, horno; 14, baño de pegamento.

Para obtener un buen bloque, cada operación en el proceso de fabricación es controlada. El tiempo y temperatura del secado del papel, la viscosidad del adhesivo, la temperatura del plato, la temperatura y tiempo de unión del bloque en el horno, la viscosidad del pegamento aplicado en las paredes del bloque, la temperatura y tiempo del secado después de la impregnación son parámetros controlados. Para examinar la calidad de unión, se cortan muestras y son probadas estirándolas lo más posible hasta su desgarramiento.

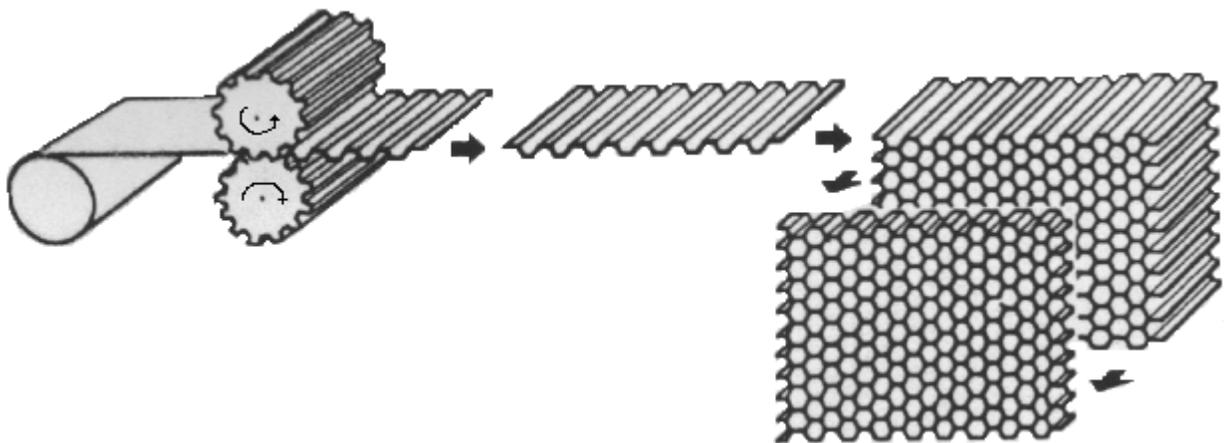


Figura 4.I.5.- Método de CORRUGADO por medio de engranes dobles

## IV.II.- Método de expansión.

El método de expansión consiste de los siguientes pasos; primero, un rollo con el material se desenrolla pasándolo a través de unos delgados rodillos, los cuales aplican el adhesivo en tiras de forma longitudinal o transversal según sea el caso, posteriormente pasa a la cámara de presecado y al salir de esta se corta en láminas con una longitud deseada (fig.4.II del paso 1 a 6).

Las láminas son apiladas formando un bloque el, cuál será prensado y curadas las líneas de adhesivo (paso 6 y 7); después sigue la etapa de expansión donde se jala al bloque por los dos lados hasta formar las celdas al tamaño requerido (paso 8).

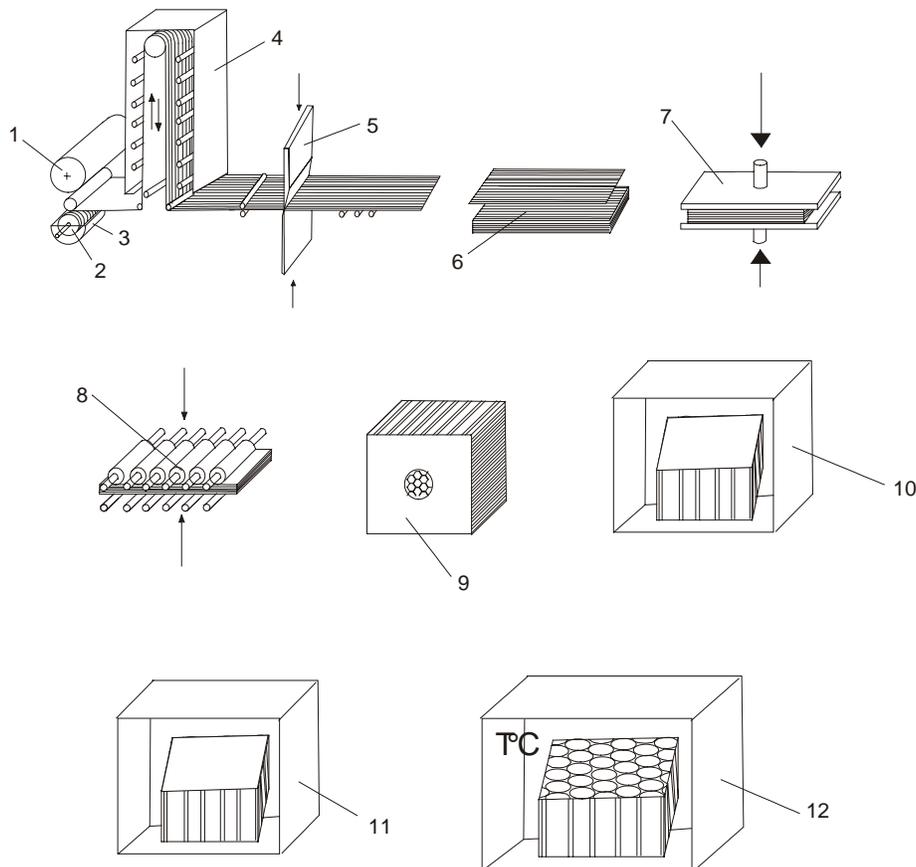


Figura 4.II.1.- Fabricación de honeycomb por medio del método de expansión: 1, rollo de papel; 2, rodillos aplicadores de adhesivo; 3, baño con adhesivo; 4, cámara de secado; 5, guillotina; 6, paquete preformado; 7, presionador; 8, dispositivo para expansión de la baraja o paquete; 9, bloque honeycomb; 10, baño con barniz; 11, baño con pegamento; 12, horno.

El bloque es puesto en una cámara donde es bañado para formar una capa con la cual se desea aumentar y controlar sus propiedades (resistencia, densidad, protección del exterior, etc.); después es llevada a un horno donde se dará la curación final controlando la temperatura y tiempo para la obtención de propiedades deseadas.

En si, todos los métodos de expansión son muy parecidos teniendo sólo algunas variantes en su proceso como son:

(B) Utilización de cámaras de secado con sus secciones de barnizado y de impregnación de pegamento (fabricación prepreg), antes de comenzar con la aplicación del adhesivo como se muestra en la figura 4.II.2.

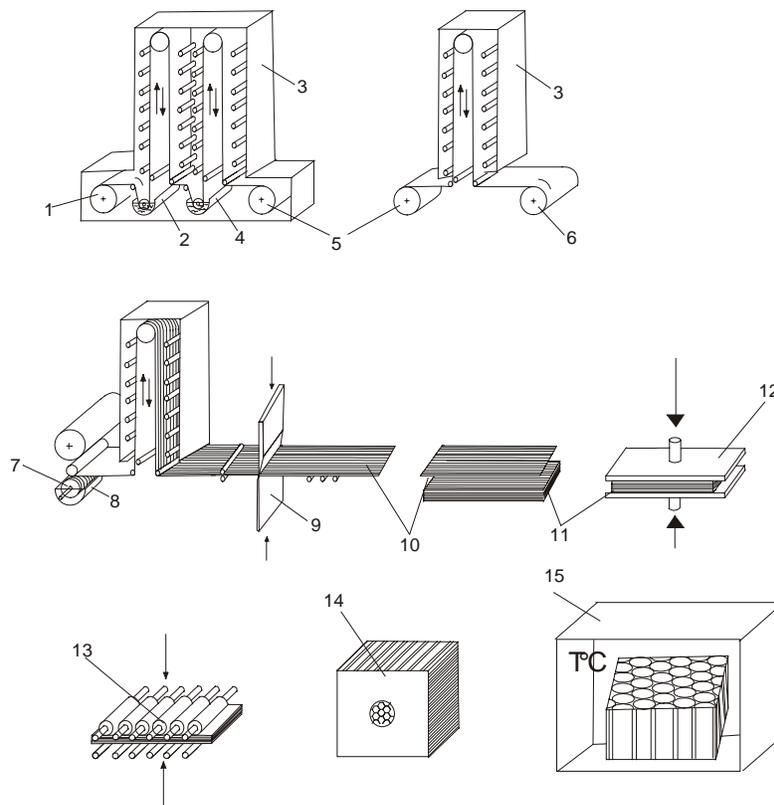


Figura 4.II.2.- Fabricación de honeycomb por medio del método expansión: 1, rollo de papel; 2, baño de barniz; 3, cámara de secado; 4, baño con pegamento; 5, rollo prepreg; 6, rollo prepreg parcialmente curado; 7, rollo aplicador de adhesivo; 8, baño con adhesivo; 9, guillotina; 10, preforma prepreg; 11, bloque honeycomb; 12, prepresión; 13, dispositivo de expansión; 14, bloque; 15, horno.

(C) Otra variante es al obtener el bloque de láminas ya presionadas y pegadas con las tiras de adhesivo, cortarlo a los espesores deseados por medio de una guillotina y posteriormente expandirlos y bañarlos dependiendo de las características deseadas, como se muestra en la figura 4.II.3.

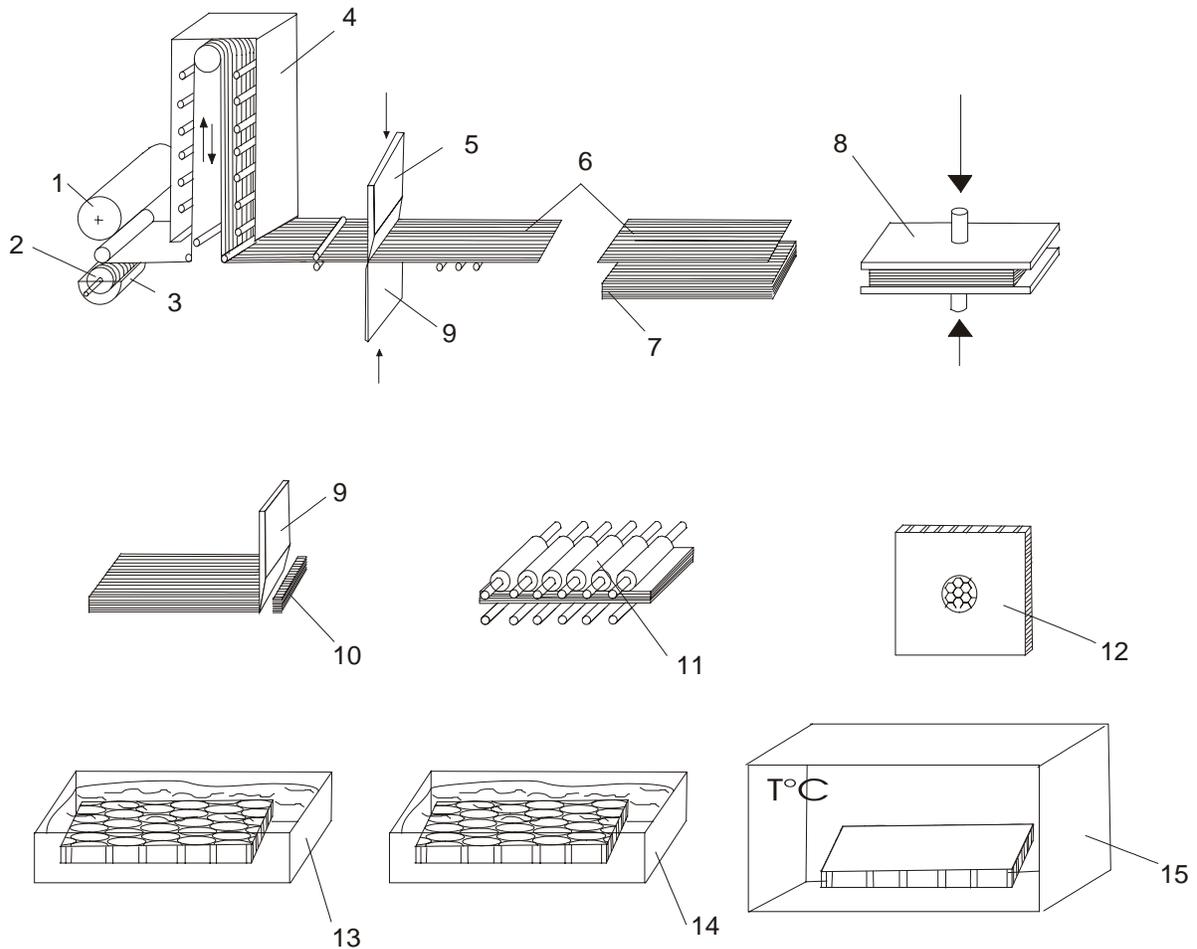


Figura 4.II.3.- Fabricación de honeycomb por el método de expansión: 1, rollo de papel; 2, aplicador de adhesivo; 3, baño con adhesivo; 4, cámara de secado; 5, guillotina; 6, preforma de papel con tiras de adhesivo; 7, paquete; 8, presión; 9, máquina cortadora de papel; 10, fracción de honeycomb; 11, dispositivo de expansión; 12, fracción expandida de honeycomb; 13, baño glaseado; 14, baño con pegamento; 15, horno.

(D) Otra variante es la combinación de las anteriores como se muestra en la figura 4.II.4.

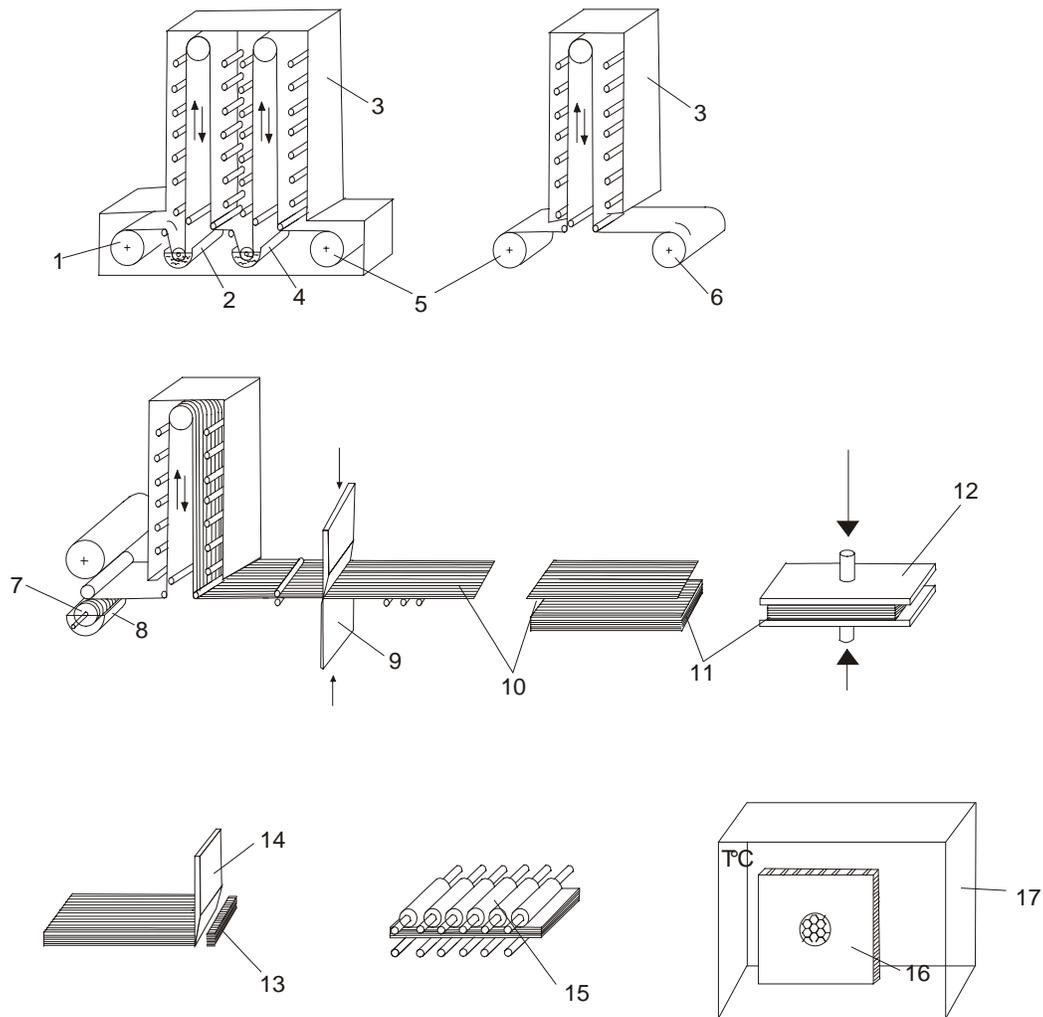


Figura 4.II.4.- Fabricación de honeycomb por medio del método expansión: 1, rollo de papel; 2, baño de barniz; 3, cámara de secado; 4, baño con pegamento; 5, rollo prepreg; 6, rollo prepreg parcialmente curado; 7, rollo aplicador de adhesivo; 8, baño con adhesivo; 9, guillotina; 10, preforma prepreg; 11, bloque honeycomb; 12, presión; 13, fracción de honeycomb; 14, maquina cortadora; 15, dispositivo de expansión; 16, fracción expandida de honeycomb.

El barnizado o glaseado del papel aramid, es realizado por medio de un baño de una sustancia basada en polamidas con la adición de un solvente activo, seguido por un secado en la cámara de secado de la máquina de impregnación, realizado paso a paso aumentando la temperatura y movimiento de una cámara a otra. Para un control visual de la homogeneidad de la capa delgada, una pequeña cantidad de solvente orgánico es sumada a la solución de glaseado.

La impregnación del barnizado es llevada a una solución de pegamento phenol-formaldeido o en una solución acuosa de melamine-formaldeido, modificada por resina epoxica y latex. El rollo de papel es llevado a través de un baño de pegamento y secado en la maquina de impregnación. El total de aplicación tanto del barnizado como el pegamento, no debe ser mayor que  $17-30 \text{ gr m}^{-2}$ . La cantidad es regulada por la velocidad del papel a través del baño de impregnación.

La calidad de impregnación se verifica visualmente. Los siguientes aspectos son examinados: partes sin impregnar, sobre flujo del pegamento, inclusión de partículas, etc. El sobre flujo es determinado por el tipo de mojado del papel, antes de la impregnación.

La aplicación de tiras de adhesivo en el prepreg es puesta por máquinas de aplicación-adhesivo, utilizando métodos de alta y profunda impresión. El método de alta impresión involucra la aplicación de tiras de adhesivo al material enrollado por medio de las superficies de discos humedecidos por una solución adhesiva phenol-rubber. Las superficies de trabajo de los discos rotatorios tienen una velocidad lineal igual a la del material transportado. Los discos están instalados en un rodillo. El ancho de las tiras de adhesivo debe ser continuo, y estas deben tener gran exactitud al ancho del disco, y además, fijar el tamaño de la capa y su viscosidad. Esto garantiza la fabricación exacta de la geometría de las celdas. Un importante aspecto de la calidad de las tiras es la velocidad del llevado del prepreg a través del la cámara de secado de la máquina: a altas velocidades el adhesivo no se seca y se desparrama cuando la hoja es transportada; si la velocidad es lenta, es posible que el adhesivo se seque muy pronto, resultando que la adhesión de las hojas del paquete no sea suficiente.

#### IV.III.- Máquinas de expansión.

Existen varios métodos de sujeción y elementos de jaloneo de una máquina de extensión. Correas hexagonales o cuadradas están unidas a las hojas externas del paquete entre las tiras del adhesivo (figura 4.III.1), y al final de estas correas están apoyadas en unas barras redondas. La fuerza del jaloneo es transmitida a las barras por medio de ganchos. En el proceso de jaloneo, la reducción del largo es compensada por el movimiento de las correas a través de las barras.

Este método es altamente friccionante, las correas rectangulares deslizándose a través de las barras teniendo una zona larga de contacto entre ellas. Esto da como resultado la no compensación del alargamiento en lo ancho, causando rompimiento a través de las líneas de unión. Para evitar esto, es necesario mover las correas hacia el centro durante el proceso de expansión, con las manos o por un dispositivo especial.

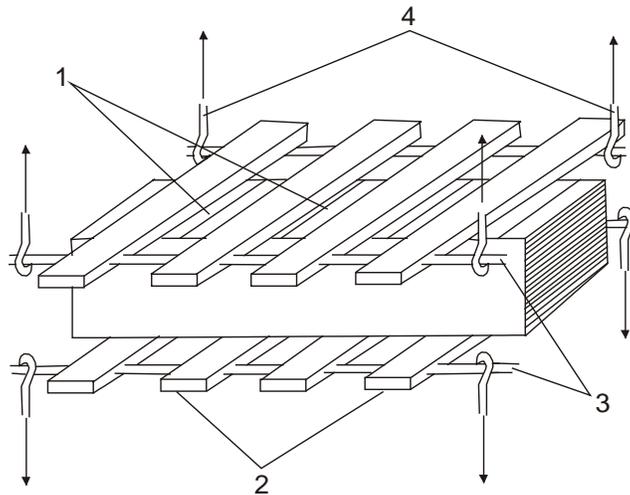


Figura 4.II.1.- Método por correas para la expansión de paquetes honeycomb: 1, tiras de adhesivo; 2, correas rectangulares; 3, barras redondas; 4, elementos jaladores.

Un método de expansión ampliamente usado, está basado en tensar por medio de una lamina curvaada, unida a las capas externas del paquete (figura 4.III.2). Si la configuración del honeycomb expandido, tiene que ser termofijada a temperaturas arriba de 200-220°C, se debe utilizar algodón goma-impregnada; para temperaturas mayores a 220°C se utiliza fibra de vidrio. Tubos de metal son puestos dentro de las curvaturas y los ejes de los tubos son puestos sobre un marco, los cuales son jalados por ganchos.

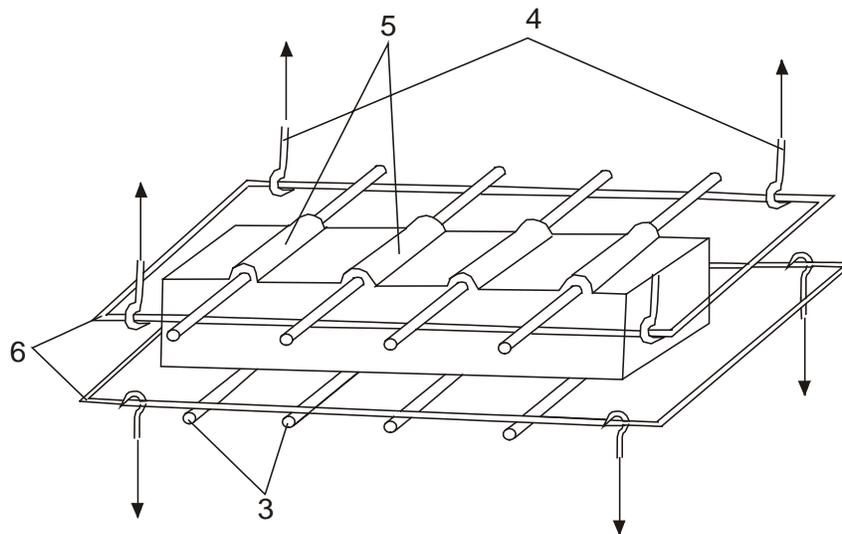


Figura 4.III.2 .- Método por elaboración de curvaturas o doblez para, la expansión de paquetes honeycomb: 3, barras redondas; 4, elementos jaladores; 5, fabricación de curvatura; 6, marco.

Otro método de expansión (figura 4.III.3. utilizado como regla en, paquetes que no son altos) está basado en el encajamiento del paquete, por medio de ganchos, los cuales son insertados dentro de las ultimas celdas. Los ganchos son unidos a barras de jaloneo.

Este proceso es laborioso, y requiere cierta experiencia; además de reforzar las paredes de las celdas jaladas, es necesario unirle una película a ambos lados del paquete, para ayudar a conservar la forma.

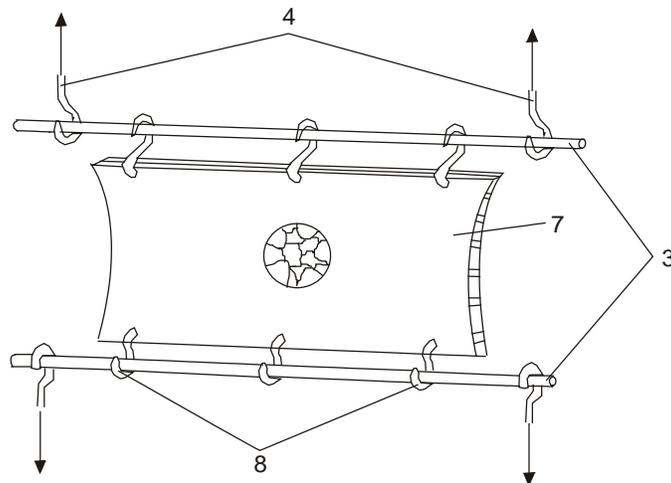


Figura 4.III.3.- Método por ganchos para la expansión de paquetes honeycomb: 3, barras redondas; 4, elementos jaladores; 7, tablero honeycomb; 8, ganchos.

Para reducir la tensión en los honeycomb basados en papel aramid con celdas no mayores a 2.5 mm, (en el proceso de expansión o después de este), el paquete es sometido a una plastificación para reducir la rigidez de las paredes de las celdas, por medio de procesos anteriores a la expansión, con un cierto periodo utilizando agua (calentada o no), o durante la expansión con el suministro de aire calentado pasándolo a través de los conductos de las celdas. También para reducir la tensión el bloque es sometido simultáneamente a compresión tanto en dirección perpendicular al eje de la celda y en la dirección de expansión. En la figura 4.III.4 se muestra el impacto de plastificación en la reducción de tensiones.

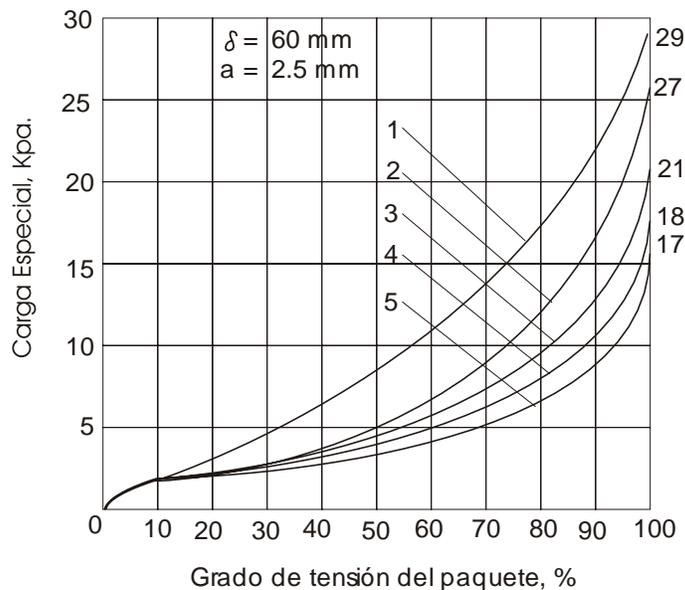


Figura 4.III.4.- Relación entre la fuerza de expansión y la temperatura de precalentamiento: 1, 20°C; 2, 100°C; 3, 130°C; 4, 160°C; 5, 190°C.

Por lo visto anteriormente podemos clasificar tres tipos de procedimientos de elaboración de honeycomb: corrugado, perfilado (por preforma o engrane – preforma) y expansión; de los cuales el método de perfilado y corrugado son prácticamente el mismo procedimiento.

Elaboramos una comparación entre los diferentes métodos, que algunos puntos dependen de los diferentes objetivos del diseño del honeycomb:

#### *Método de Expansión*

##### **-Ventajas:**

Para materiales metálicos y no metálicos  
Sencillez en la elaboración de una máquina.  
Se utiliza en mayor proporción para materiales de tipo papel.  
Para la obtención de diferentes tamaños de celda solo se cambia la distribución del adhesivo.  
La unión de nodos es más sencilla y en pocos pasos.  
Nodos mas delgados (1%).  
Mas métodos de corte y mas sencillos como la utilización de una guillotina antes de la expansión, pero no deja un excelente acabado en el corte.

##### **-Desventajas:**

Necesita mecanismos de expansión, que al expandir es un poco difícil obtener ciertas geometrías.  
Se necesita un retenedor de expansión (cuándo se utiliza papel), y en ocasiones un tratamiento superficial o barnizado después de la expansión, puesto que no se puede antes.  
Solo en láminas de cierto espesor.

#### *Método de Perfilado y Corrugado.*

##### **-Desventajas:**

Para materiales que puedan deformarse y quedarse con la forma predeterminada.  
Complicada elaboración de los elementos de la máquina como son las preformas, barras y engranes.  
Para cada tamaño de celda, se tiene que cambiar la preforma, engranes y barras.  
Mayor costo.  
Nodos mas gruesos (10%).

##### **-Ventajas:**

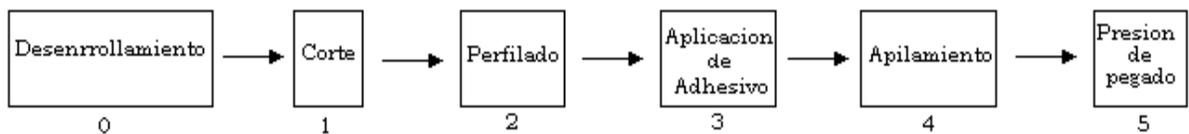
Mejor geometría de celda.  
Se pueden realizar geometrías complejas.  
Se puede reforzar los nodos.  
Se puede realizar en materiales mas duros y mas resistentes a la deformación.  
El barnizado de una capa protectora puede ser antes de la deformación.  
Se pueden utilizar diferentes métodos de unión dependiendo de las necesidades como soldadura, difusión, etc., siendo mas resistentes sobre todo en temperaturas extremas.  
Puede utilizar láminas de altas densidades, gruesas o delgadas.

Diagramas de flujo de los procedimientos básicos en la elaboración de honeycomb:

Método de expansión (ME):



Método de perfilado (MP):



En los diagramas de flujo podemos decir que el número de pasos del procedimiento de cada uno es casi el mismo, la gran diferencia se da en la complejidad de estos.

Comparando el paso 1ME con el paso 0 y 3 MP, el desenrollamiento es el mismo, la diferencia será en la aplicación del adhesivo, que en el caso del ME, se da al mismo tiempo y la aplicación es sencilla a diferencia del MP, que tiene que ser en otra etapa, por medio de otro mecanismo que de movimiento y posicionamiento relativo de las laminas y rodillos de aplicación de adhesivo.

De la etapa de apilamiento, es mas fácil en el ME por utilizar láminas planas a diferencia del MP que ya tienen un perfil; siendo lo mismo en la presión de pegado ya que en el ME no necesita implementos adecuados, solo una fuerza requerida.

La etapa de expansión, es la que a diferencia del método de perfilado es mas difícil por lo elaborado de esta, así como los instrumentos necesarios para llevarla a cabo, pero todo esto se compensa con la dificultad de la etapa 2 del método de perfilado, dónde es una parte complicada por la necesidad de la utilización de mecanismos. En otras palabras solo la etapa de expansión es de cierta complicación, pero con la sencillez de las demás etapas resulta ser mucho mas factible este proceso.

El mejor conocimiento y entendimiento de los procesos de fabricación, nos ayuda a proporcionar mejoras en los cambios del diseño de estas máquinas, así como la creación de nuevos procesos los cuales se beneficiará directamente en el material obtenido, los cuales están contemplados capítulo siguiente.

**CAP V.- PROPUESTAS DE MEJORA  
DE UNA MAQUINA PARA  
ELABORAR HONEYCOMB.**

# CAP V.- PRPUESTAS DE MEJORA DE UNA MÁQUINA PARA ELABORAR HONEYCOMB.

Dentro del diseño de una máquina para la elaboración de estructuras tipo honeycomb, está contemplado cubrir las necesidades de mejorar los procesos, obtener mejores propiedades de las estructuras mediante la solución a ciertos factores que producen problemas frecuentes en el producto final, como son: el control de la línea de unión y problemas de aplicación del adhesivo, que se reflejan directamente en la resistencia de los nodos de las celdas y en las propiedades del honeycomb.

Dentro de estas propuestas tenemos cinco conceptos u opciones las cuales son de fácil elaboración, además mejoraran las características de los materiales elaborados.

También proponemos un mecanismo de expansión para el material obtenido, así como un método alternativo para elaborar honeycomb.

## V.1.-Máquina de Perforado:

Este procedimiento consiste como se ha visto anteriormente en una primera etapa que es la de desenrollamiento, se realizará por medio de dos cilindros, que giran en dirección contraria del enrollamiento del carrete para enderezar la superficie de la lámina lo más posible. La segunda etapa es la de perforado, por medio de otros dos cilindros que se encuentran uno por cada lado de la lámina, el cilindro colocado en la parte superior sirve de contrapresión al cilindro de abajo; el cilindro de abajo tiene en su superficie pequeñas salientes o agujas las cuales están distribuidas linealmente, cada hilera está separada un ángulo  $\theta$  dependiendo del diseño de la celda del honeycomb, este cilindro además de agujerar la lamina también se encarga de darle movimiento. La tercera etapa es la de aplicación del adhesivo, se da mediante un cilindro colocado por la parte de abajo de la lámina de la cual tiene unos pequeños bordes lineales separados un ángulo  $\theta$ , este cilindro se encuentra parcialmente sumergido en el adhesivo. El ángulo  $\theta$ , el diámetro del cilindro y su velocidad de giro, debe ser igual al cilindro que contiene las agujas (impulsor), para coordinar la aplicación del adhesivo con los agujeros creados anteriormente. Figura 5.1

Si pensamos realizar las líneas en dirección longitudinal (misma dirección del movimiento de la lámina), sería muy complicado debido a que la distancia entre las perforaciones no se podría modificar fácilmente, además de no poder obtener distancias cortas entre las perforaciones debido a la curvatura del cilindro y de esta forma tener paneles de mayor tamaño.

El cilindro que funciona como contra punto para el agujerado debe ser de un polímero resistente, que a su vez permita la introducción y evitar lo mas posible el desgaste y ruptura de las puntas de las agujas.

El cilindro que porta las agujas es de acero, el cual es manufacturado unos pequeños canales longitudinales de perfil triangular en los cuales se colocan las bases de las agujas.

El cilindro de aplicación de adhesivo puede ser de Aluminio debido a que no se necesitan grandes propiedades en cuanto resistencia, desgaste; es ligero y de fácil manufactura para la elaboración de los bordes longitudinales para la aplicación del adhesivo.

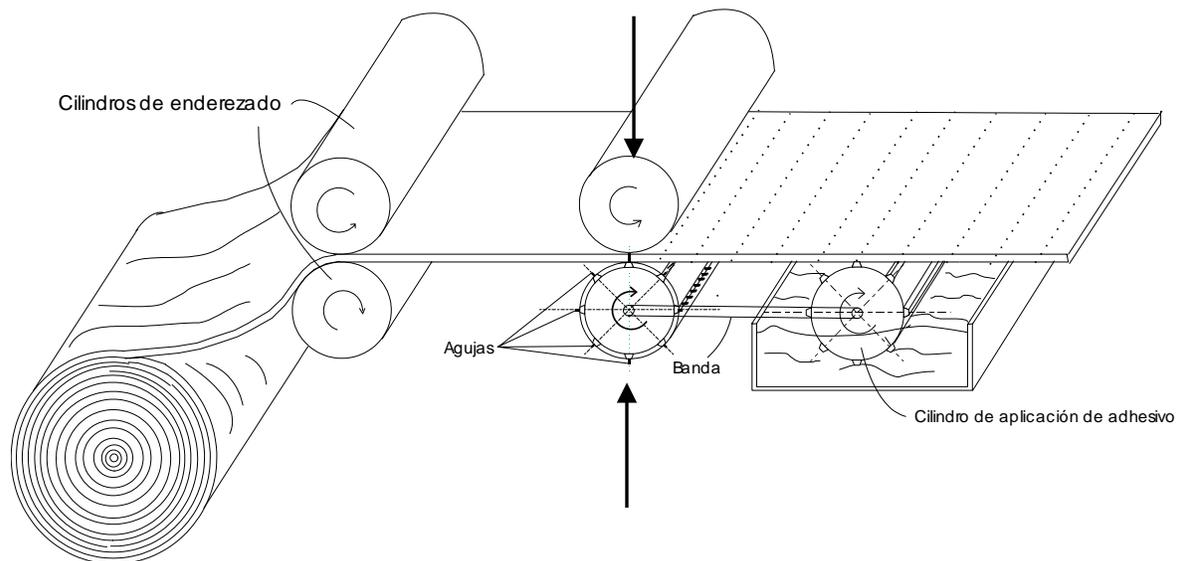


Figura 5.1.- Máquina para elaborar honeycomb por el método de agujerado.

La altura de las agujas es muy pequeña puesto que depende del espesor de la lámina (0.4mm max.), esto es muy bueno debido a que menor longitud mayor resistencia tendrá. Pueden ser elaboradas de acero con tratamiento de endurecido (temple) aunque no es tan demandante su resistencia ya que los materiales a trabajar serán de poca resistencia como el aluminio y de pequeño espesor (0.25mm), pero su resistencia al desgaste es un punto importante ha considerar, por lo que un tratamiento térmico superficial en las puntas será muy adecuado.

Al ir girando el cilindro provoca que al penetrar la aguja no solo perfora la lámina sino de la fuerza necesaria para su movimiento, por lo que la forma de las perforaciones obtenidas será de elipse en sentido del movimiento de la lámina (Fig 5.2).

Este método dará mucho mayor resistencia en la unión de los nodos, sobre todo en esfuerzos de tipo cortante, evitando el resbalamiento en los puntos de unión (tipo remache).

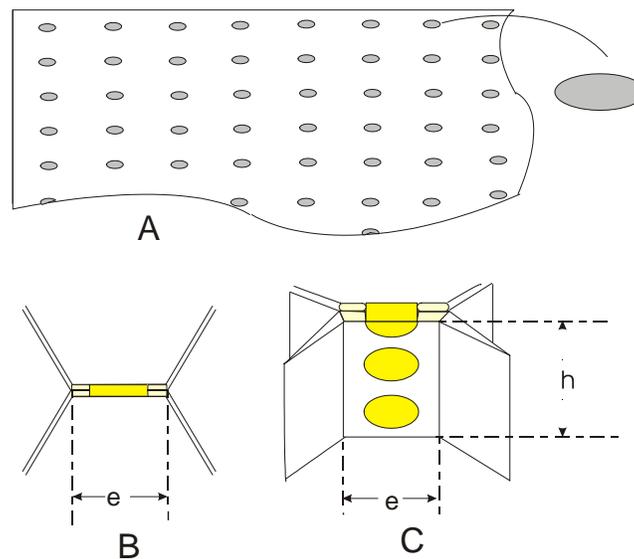


Figura 5.2.- Detalle de obtención de la lamina perforada (arriba). Este método dará una mucha mayor resistencia en la unión de los nodos de las celdas sobre todo en esfuerzos de tipo cortantes evitando el resbalamiento en los puntos de unión de los nodos. El pegamento incrustado en las perforaciones realizara una labor parecida a la unión de tipo de remaches o tornillos.

Posteriormente se cortarán y se apilarán las láminas para la etapa de presionado y curado.

La aguja debe soportar tanto esfuerzos cortantes, normales y sobre todo flexionantes

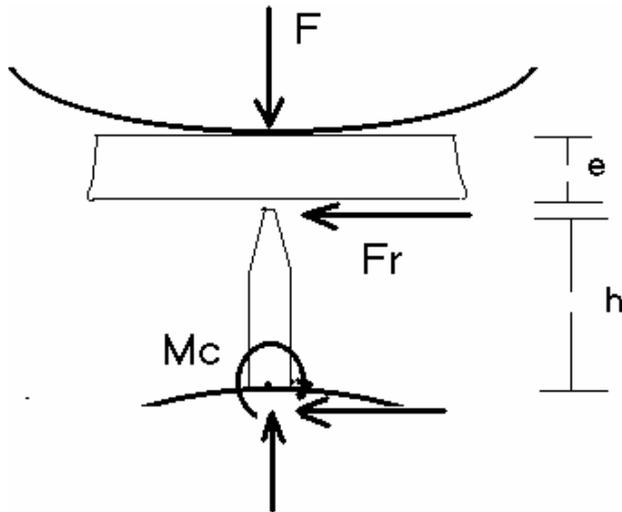


Figura 5.3.- Esquema de aplicación de fuerzas.

Si el esfuerzo cortante de la lámina de aluminio es de 60MPa.

$$h = 0.003m; \quad ; \quad e = 0.00025m \quad ; \quad \phi = 0.001m$$

donde  $h$  es la altura de la aguja;  $e$ , es el espesor de la lámina y  $\phi$  es el diámetro de la aguja.

$$F = \sigma \cdot A$$

$$A = \text{Perimetro} \cdot e$$

$$A = (\pi \cdot \phi)(e)$$

$$F = 55N$$

Donde  $F$  es la fuerza necesaria para agujerar la lámina.

Si el coeficiente de fricción es aprox 1

$$F_r = F$$

Por lo tanto el esfuerzo a la compresión que estará sometida la aguja será:

$$\mathcal{G} = \frac{F}{A} ; A = \pi \cdot \frac{\phi^2}{4}$$

$$\mathcal{G} = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot \phi^2}$$

$$\mathcal{G} = 70.035 \text{MPa} \quad \text{esfuerzo a compresión}$$

como  $F_r = F$  el esfuerzo cortante es de igual magnitud

$$\sigma = 70.35 \text{MPa} \quad \text{esfuerzo cortante}$$

El esfuerzo debido a la tendencia al giro (flexo-compresión) será:

$$\sum M_c = 0$$

$$M_c = F_r \cdot h$$

$$M_c = 0.0165 \text{Nm}$$

$$\sigma = \frac{M_c \cdot y}{I} \quad \text{donde} \quad y = \frac{\phi}{2} ; I = \frac{\pi \phi^4}{64}$$

$$\sigma = \frac{32 M_c}{\pi \cdot \phi^3}$$

$$\sigma = 168.16 \text{MPa}$$

Por lo tanto el esfuerzo determinante es 170Mpa. flexocompresión, debido a que las agujas no solo tendrán que agujerar sino proporcionarán el movimiento a la lámina.

Debido al bajo esfuerzo obtenido, una gran variedad de materiales cumple con este requisito, por lo que otros factores como el desgaste será de gran importancia considerar además del maquinado para la obtención de estos rodillos, costo, etc.

## V.2.- Máquina de Punzonado:

Esta máquina es muy similar al del agujerado, en cambio, ocupará unos punzadores en lugar de agujas, los cuales tendrán forma cónica de poca altura. Al igual que el método anterior, no sólo estampará su forma sino proporcionará el movimiento a la lámina, el cilindro colocado en la parte inferior sirve de contrapresión al cilindro superior; el cilindro superior tiene en su superficie pequeñas salientes o punzones los cuales están distribuidos linealmente, cada hilera está separada un ángulo  $\theta$ , dependiendo del diseño de la celda (la distribución de los punzones también puede ser radial, mediante de diferentes discos colocados uno tras otro longitudinalmente). Los punzones son de forma cónica para un mejor empalme entre los diferentes conos obtenidos. La tercera etapa es la de aplicación del adhesivo, la cual se da mediante un cilindro colocado en la parte inferior el cual tiene unos pequeños bordes lineales de esponja o material suave, separados un ángulo  $\theta$ , este cilindro se encuentra sumergido en el adhesivo; el ángulo  $\theta$ , el diámetro del cilindro y su velocidad de giro debe de ser igual al cilindro que contiene los punzones, para coordinar la aplicación del adhesivo en la parte exterior de los pequeños conos formados anteriormente (figura 5.3).

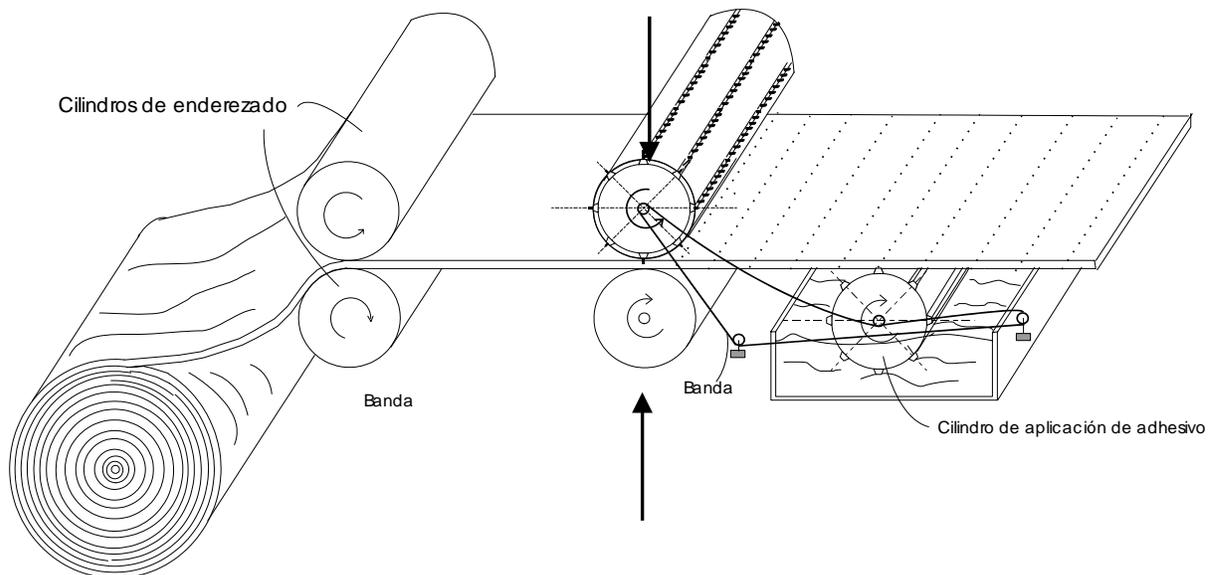


Figura 5.3.- Máquina para elaborar honeycomb por el método de punzonado.

En esta máquina, es importante que la aplicación del adhesivo sea en la parte externa del cono, ya que si fuera en la parte interna del este, podría quedar aire atrapado en la cavidad del cono, el cual posteriormente provocará problemas de empalme y pegado de los diferentes nodos (figura 5.4); debido a esto el cilindro de punzonado se encuentra en la parte superior a diferencia de las otras máquinas.

En este método se trata de que al momento de apilar las láminas cada hendidura coincida, la parte superior del cono de la lámina de abajo encaje con la base del cono de la lámina superior (Figura 5.4). Esto permitirá una mejor adhesión provocando que soporte mayores esfuerzos.

Posteriormente se cortarán y se apilarán las láminas para la etapa de presionado y curado.

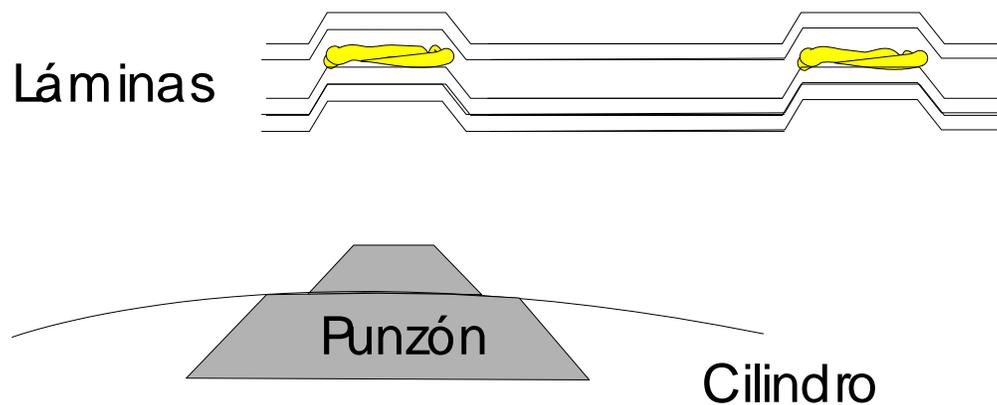


Figura 5.4.- Detalle en el pegado de las láminas de punzonado.

Dentro del análisis de la máquina de punzonado a diferencia de la de agujerado, tenemos una fuerza de 60N, suficiente para dar la defomación, ademas otra ventaja es que al no ser necesaria traspasar la lámina el punzon puede ser de su base mas ancha que la punta por lo cual puede oportar mayores esfuerzos, donde:

$$F = 60N \quad \text{si} \quad \mu \rightarrow 1 \quad F_r = F$$

$$h = 0.003m \quad ; \quad \phi = 0.002m$$

donde  $h$  es la altura del punzon, y  $\phi$  es el diámetro del punzon.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad ; \quad A = \pi \phi^2 / 4$$

$$\sigma = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot \phi^2}$$

$\sigma = 19.2MPa$  esfuerzo a compresión, y cortante debido que  $F_r = F$ .

$$\sum M_c = 0$$

$$M_c = F_r \cdot h$$

$$M_c = 0.18Nm$$

$$\sigma = \frac{M_c \cdot y}{I} \quad \text{donde} \quad y = \phi / 2 \quad ; \quad I = \frac{\pi \phi^4}{64}$$

$$\sigma = \frac{32M_c}{\pi \cdot \phi^3}$$

$\sigma = 230.4MPa$  flexocompresión

### V.3.- Máquina de Rayado:

Este procedimiento consiste como se ha visto anteriormente en una primera etapa que es la de desenrollamiento, que se realiza por medio de dos cilindros en dirección contraria del enrollamiento del carrete para enderezar la superficie de la lámina lo más posible. La segunda etapa es la de rayado por medio de un cilindro por un lado haciendo contrapresión con unos rayadores que estarán separados entre ellos una distancia  $d$ , dependiendo del tamaño de la celda deseada (figura 5.5). Posteriormente se tienen otro par de cilindros los cuales tienen la función primordial de dar movimiento a la lámina y al mismo tiempo el enderezamiento y aplastamiento de superficies que pudiesen quedar levantadas debido al rayado; después, está la etapa de aplicación del adhesivo, la cual se realiza mediante unos rodillos sumergidos en el adhesivo de un cierto espesor que depende de las características de la celda y nodos deseados (figura 5.6).

Al rayar la lámina no solo damos los canales para la colocación del adhesivo, sino también limpiamos la superficie para un mejor pegado, además tanto en los pasados métodos y sobre todo en este se puede presentar problemas de pegado por suciedad.

Posteriormente se cortarán y se apilarán las láminas para la etapa de presionado y curado.

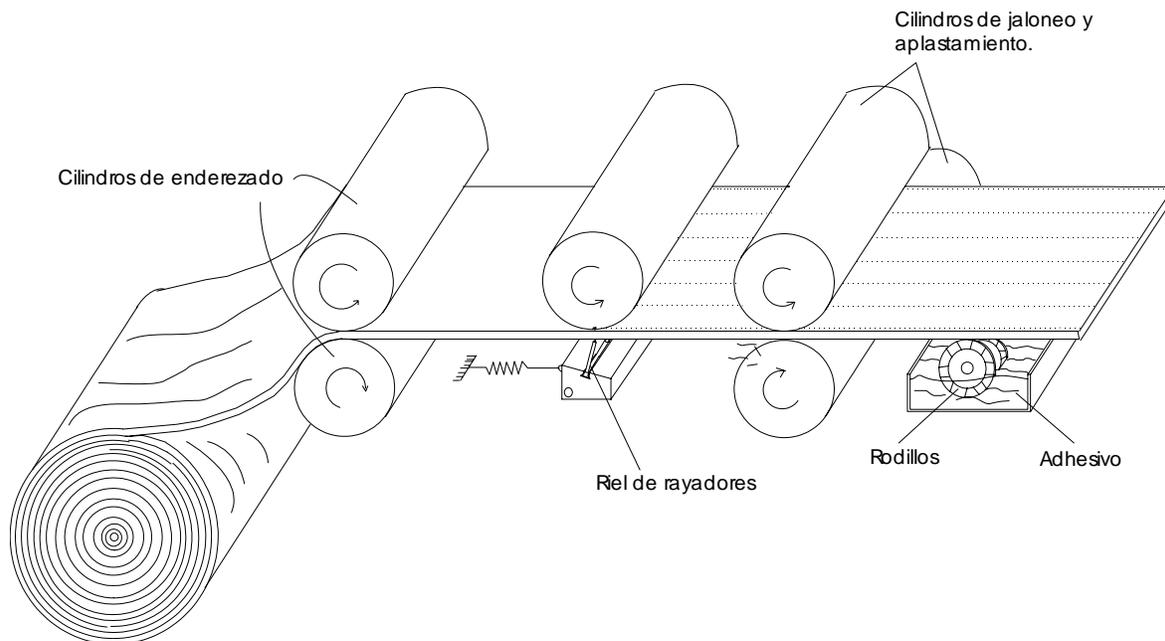


Figura 5.5.- Máquina para elaborar honeycomb por el método de rayado.

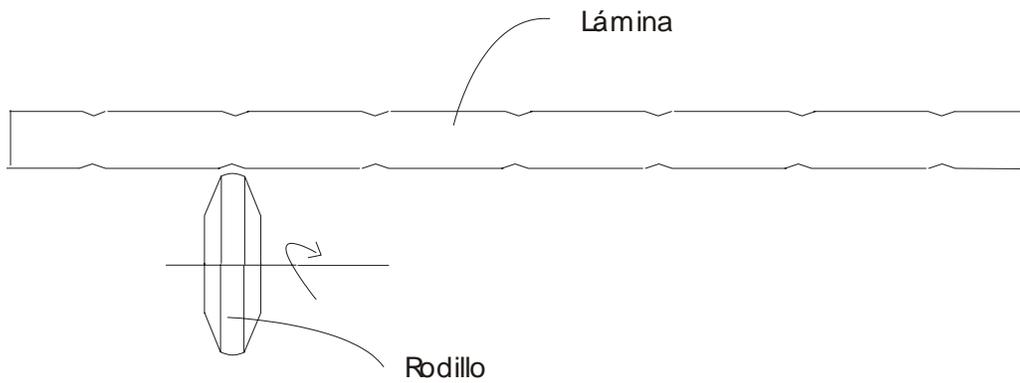


Figura 5.6.- Detalle de aplicación de adhesivo, en el método de rayado.

El análisis es mucho más sencillo, debido a que no hay que perforar ni conformar la lámina en cuanto a esfuerzos se refiere, pero el factor primordial ha de tomarse en cuenta es el factor de desgaste de las agujas de rayado.

#### V.4.- Máquina de Hilado:

Esta máquina consiste de unos carretes de hilo, de los cuales los hilos pasan a través de un depósito por medio de unos pequeños orificios en la base, el cual contiene adhesivo; los hilos son impregnados del adhesivo, posteriormente son alineados, pegados y jalados junto con el inicio de la lámina que pasa a través de un cilindro de diámetro mayor, este diámetro es mayor para que la lámina tenga una cierta curvatura que ayude al pegado de los hilos, además es importante la posición de los hilos impregnados referente a la ubicación del inicio de contacto del hilo con la lámina, que ayudará a tensionar y controlar su alineación. Es importante controlar la velocidad de la lámina, que estará limitada por la velocidad de impregnación de los hilos con el adhesivo (Figura 5.7).

Debe existir una tensión en los hilos para no perder la rectitud de las líneas, los cuales deben de un material compatible al pegado.

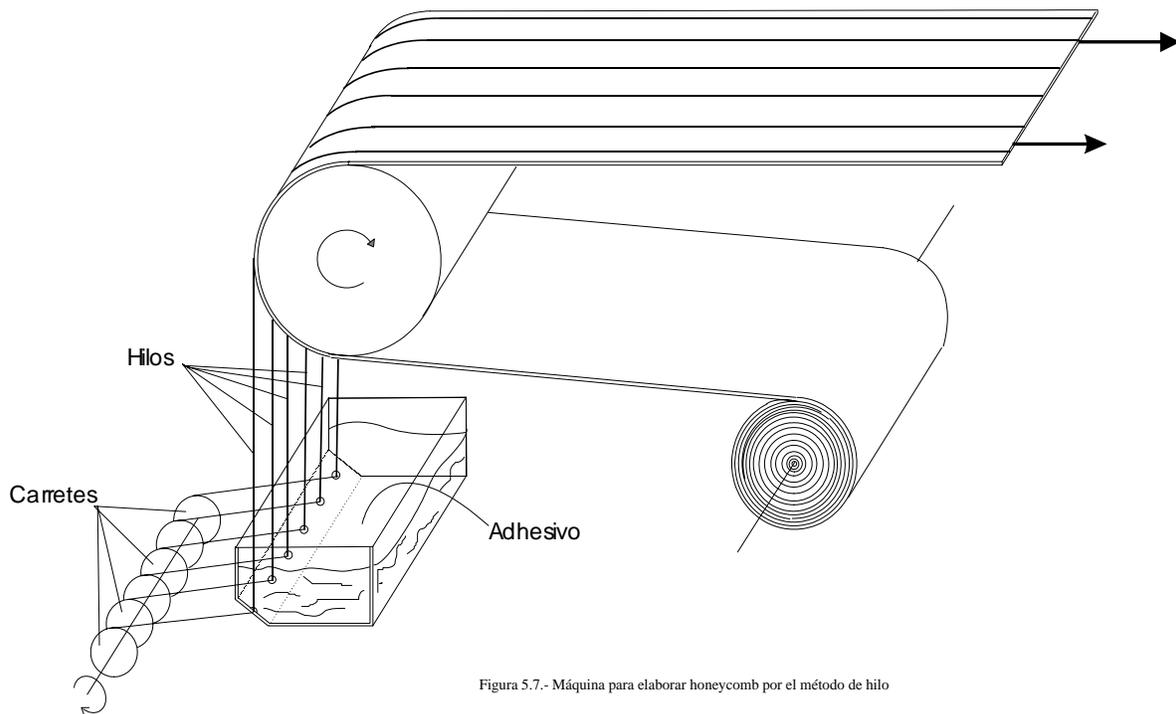


Figura 5.7.- Máquina para elaborar honeycomb por el método de hilo

**V.5.- Máquina de elaboración de honeycomb por el método de rayado doble.**

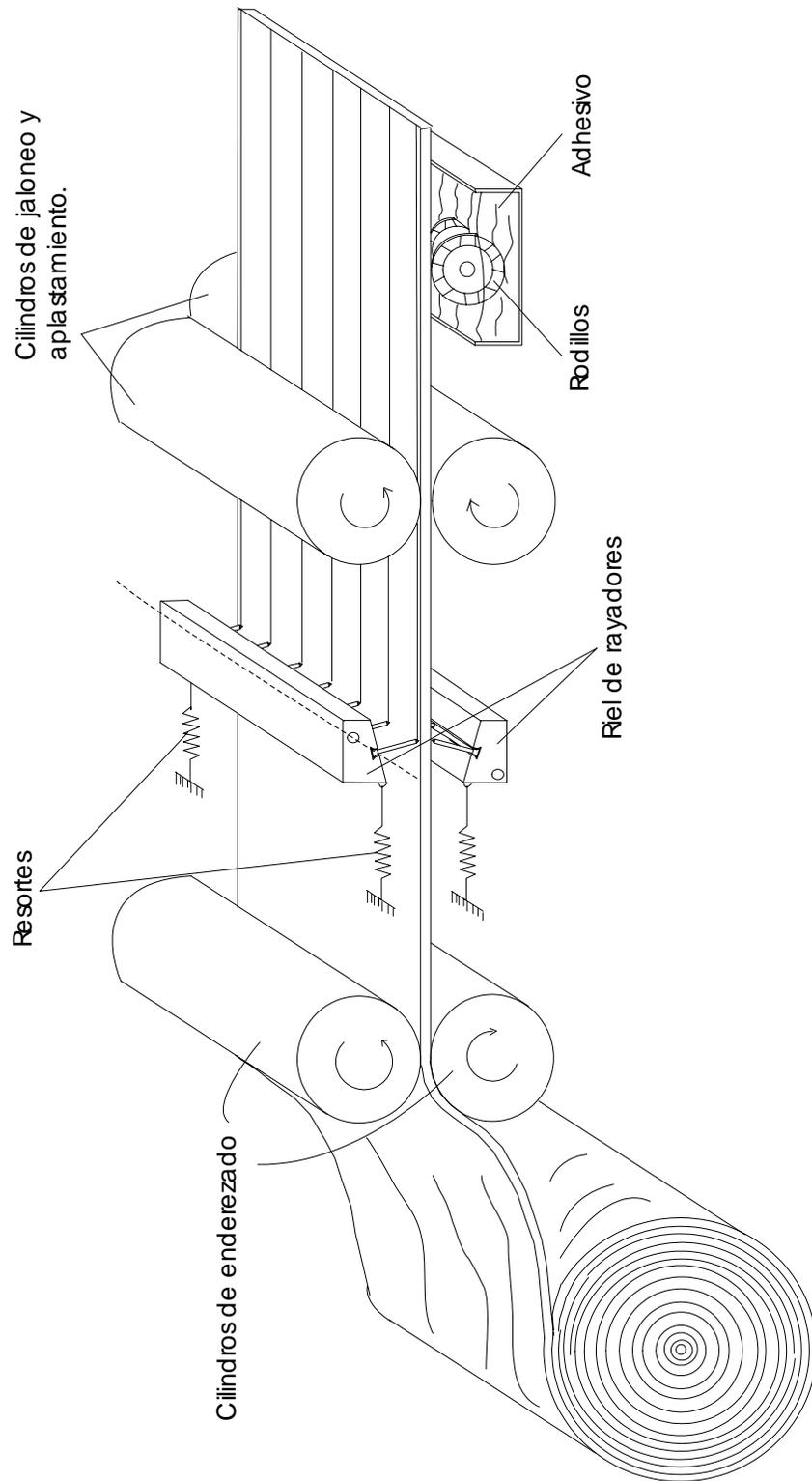


Figura 5.11.- Máquina para elaborar honeycomb por el método de rayado doble

Como ya mencionamos esta máquina tiene grandes beneficios en la elaboración del honeycomb. También si es el caso en lugar de utilizar un cilindro como contra presión es posible sustituirlo por otros rayadores en la parte superior de la lámina, obteniendo de esta forma el rayado por las dos caras de la superficie (Figura 5.11).

Los rayadores estarán enroscados en el porta herramienta el cual tiene un perfil igual a los separadores, los cuales entran en el riel de rayadores, dependiendo de la longitud de los separadores se pueden lograr diferentes distancias entre los nodos de un centro, logrando un gran número de configuraciones, tamaños de celda. El Riel de rayadores esta sujeto en un extremo el cual tiene la libertad de girar (la ubicación de este punto de libertad depende del rayado superior o inferior de la lámina), en el otro extremo se encuentra sujeto a un resorte el cual provocará la presión deseada del rayador sobre la lámina siendo esta de una forma constante e independiente del desgaste y movimientos de la lámina, Figura 5.8.

Los rayadores pueden ser de diferentes diseños tanto características deseamos en las celdas, peden de ser de uno o varios dientes, el espesor de cada uno dependerá del numero de dientes así como el ancho de la línea del adhesivo y el nodo deseado. Un factor importante en el diseño de estos el ángulo o salida que se le de para el desprendimiento de la viruta que es muy importante que no queden en la lamina en la cual se le añadirá el adhesivo, si es el caso, se le puede dar una siguiente etapa con una herramienta de desalojamiento de esta, (espátula), Figura 5.9.

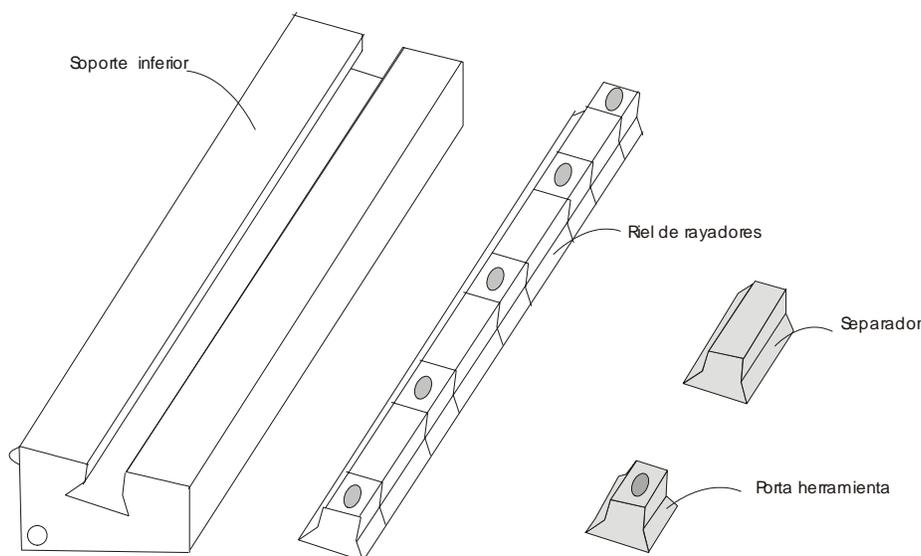


Figura 5.8.- Muestra las diferentes partes para alojar y distribuir a los rayadores. Existen separadores de diferentes largos.

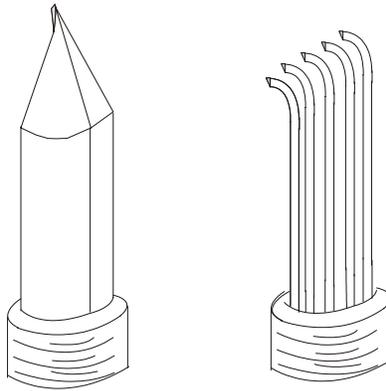


Figura 5.9.- Rayadores de una sola punta (izquierda), y en forma de cepillo (derecha).

Un factor importante es el ángulo de contacto  $\theta$ , entre la lámina y el rayador como se ha mostrado (fig. 5.10). Este ángulo es para evitar que se atasque o penetre la lámina; se aconseja un ángulo menor de  $70^\circ$ .

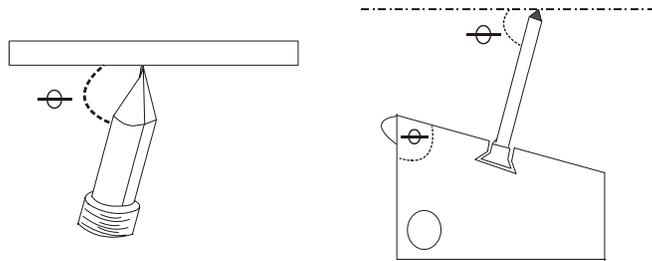


Figura 5.10.- Angulo direccional de contacto  $\theta$  que debe de ser menor a  $70^\circ$

Dentro de los materiales ha escoger para los rayadores no está limitado debido a que los materiales ha trabajar tienen una gran ductibilidad, por lo cual se recomienda agujas-rayadores de bajo carbono con un tratamiento térmico en las puntas para que tenga esa resistencia al desgaste y el tallo no pierda esa ductibilidad. También se podría utilizar inserto de materiales como carburos de tungsteno en las puntas, pero su costo y debido a que no necesita grandes resistencias no lo justifica.

La primordial ventaja es el control del ancho de la línea del adhesivo, obteniendo nodos mas exactos evitando problemas como escurrimientos, haciendo una distribución homogénea e uniforme del adhesivo, asegurando que no se quede alguna parte sin este. También mejora el apilamiento de las láminas (Fig.5.12)

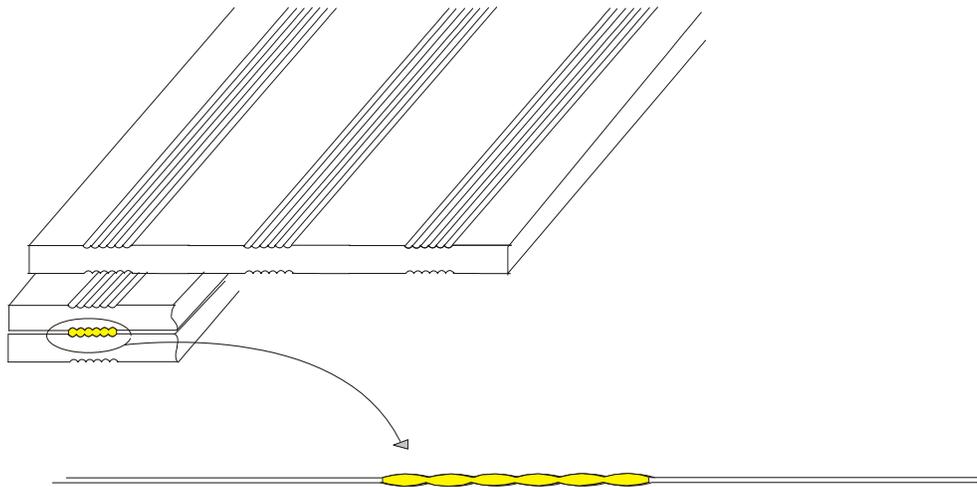


Figura 5.12.- Muestra el control y mejoramiento de los nodos de las celdas del centro de honeycomb, mediante el rayado de las superficies.

La limpieza, es un factor primordial para una buena adhesión entre los nodos, mas que hacer canales los rayadores limpian las superficies que pudieran tener suciedad o en el caso del aluminio desprende esa pequeña capa de pasivación que se forma en su superficie, mejorando las características de pegado.

## Mecanismo de extensión de centro honeycomb

Para expandir los centros honeycomb al tamaño y geometría de celdas deseados, se propone una serie de barras conectadas entre si, por la parte de en medio y en sus extremos por medio de bisagras de libre movimiento, las cuales a su vez tienen una extensión la cuales entran dentro de algunas celdas Figura5.13.

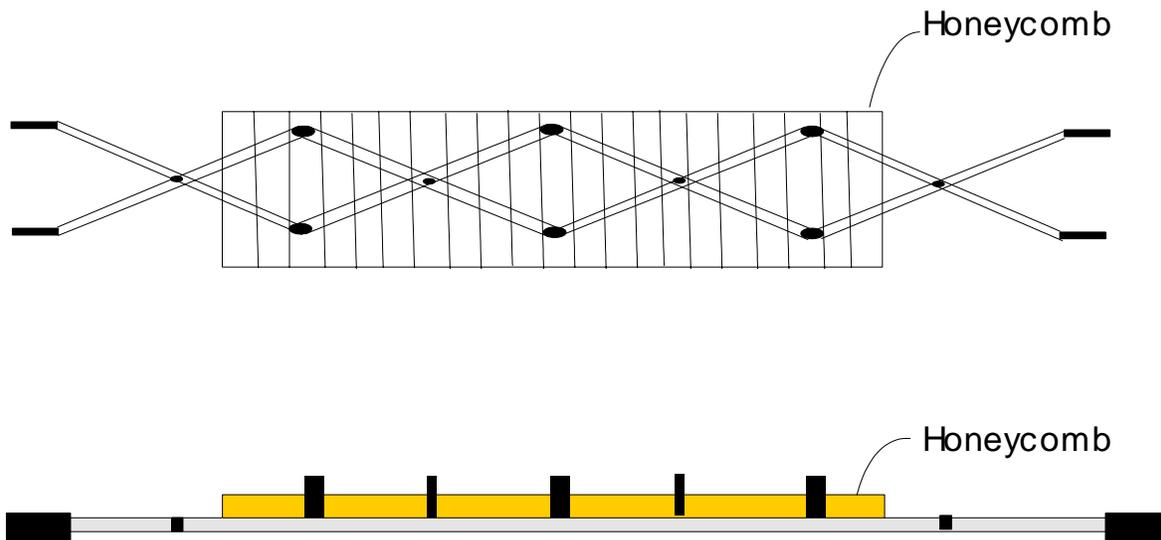


Figura 5.13.- Mecanismo de expansión por medio de barras. Vista superior (arriba), vista frontal (abajo).

Al aplicar una fuerza de cerrado en los mangos de estas, provocará el movimiento hacia fuera y al centro (figura 5.13), el alargamiento se compensa con el adelgazamiento del centro.

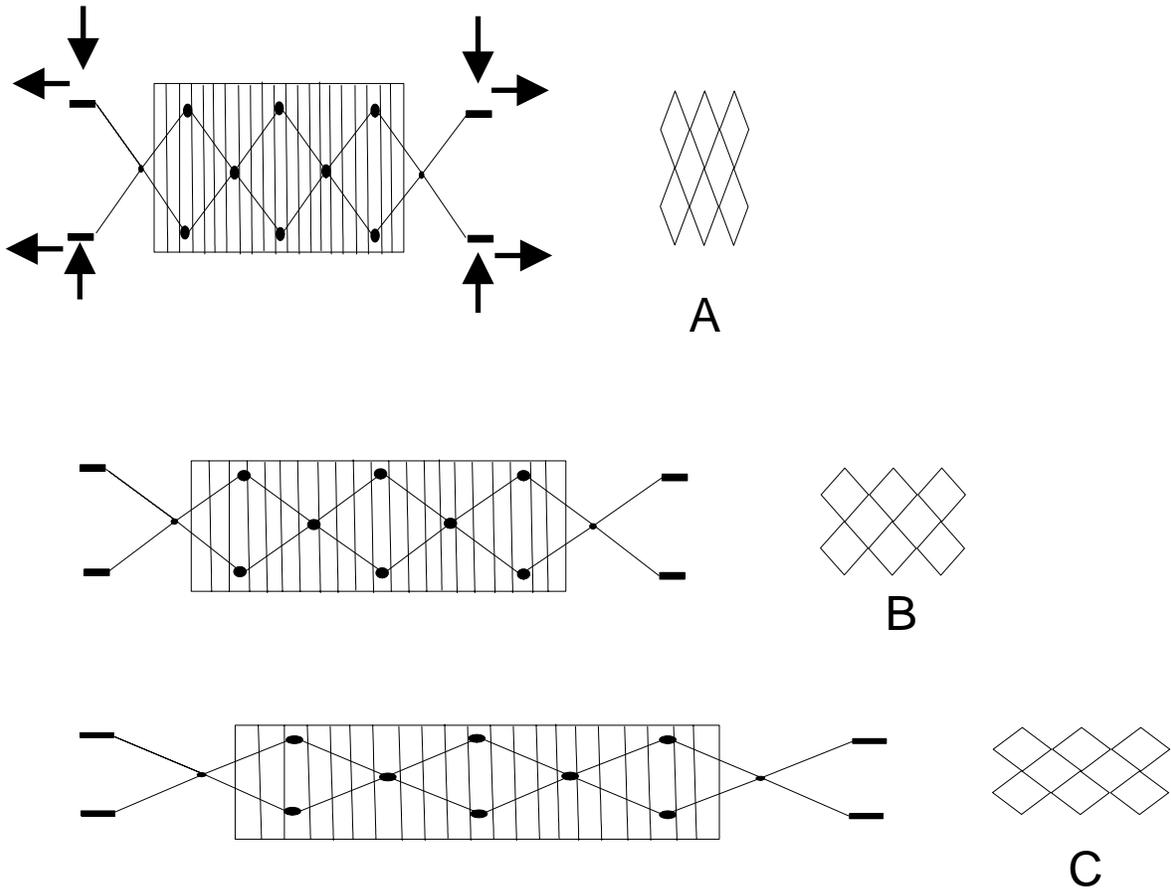


Figura 5.14.- Muestras de las diferentes etapas de extensión de centros honeycomb, así como las diferentes geometrías que pueden ser obtenidas.

Adicionalmente se elaboró un método alternativo el cual nos dio la oportunidad de experimentar y ver en una forma practica los resultados de las propiedades que se obtiene en este tipo de materiales.

### **Método Alternativo:**

Este método consiste que en lugar de tener una lámina, se tiene una serie de tubulares los cuales se encontraran apilados dentro de una abrazadera, la cual distribuirá a todos los popotes uniformemente. Esta abrazadera junto con los tubulares, será sumergida en un adhesivo, posteriormente será apretada reduciendo su área, provocando una presión uniforme entre todos los tubulares y así una mejor adherencia entre ellos, con un menor número de espacios vacíos.

Después de la curación, se obtiene un bloque, al cual se le puede manufacturar a la forma deseada mediante una fresa o también se puede utilizar un hilo caliente, el cual cortará el bloque a la forma y espesores deseados. Figura 5.15 y 5.16.

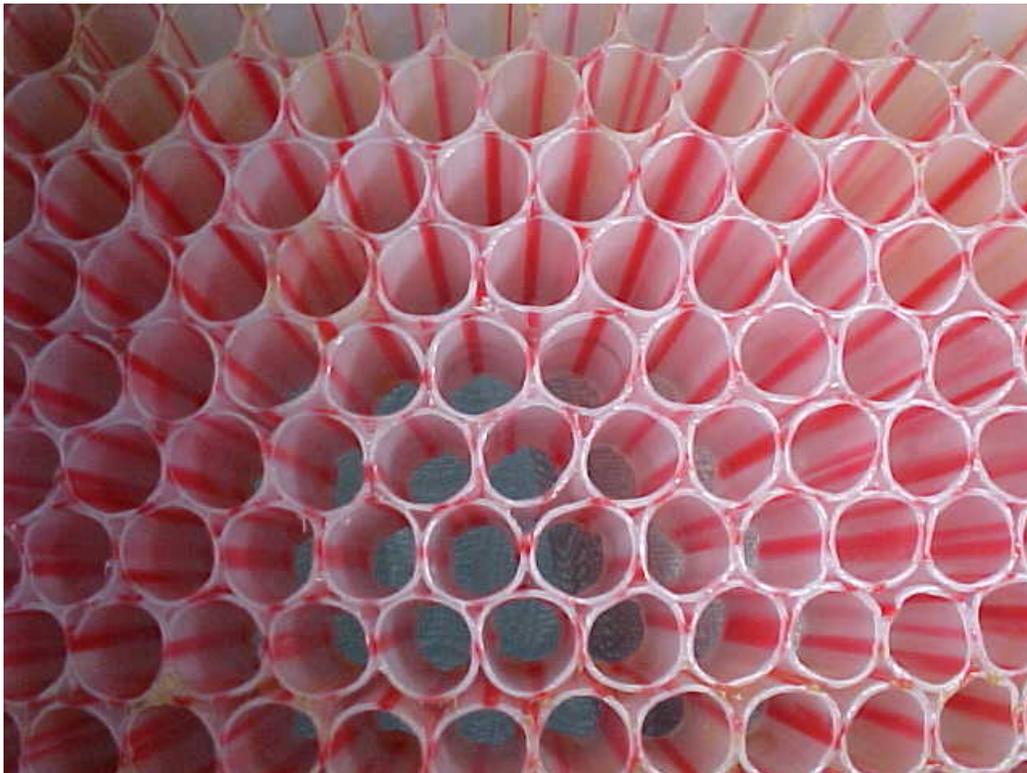


Fig. 5.15.- Unión de tubulares para la elaboración de centros honeycomb.



Figura 5.16.- Bloque de tubulares después de ser cortados al tamaño y forma deseada.

Después está la etapa de planchado, la cual consiste en pasar una plancha calentada por toda la superficie de la estructura con la forma deseada, logrando aplanarla, rectificar la superficie y sobre todo lograr que las puntas se fundan y se adhieran entre ellas, logrando una mayor solidez de la estructura además de evitar desprendimientos posteriores (Figura 5.17).

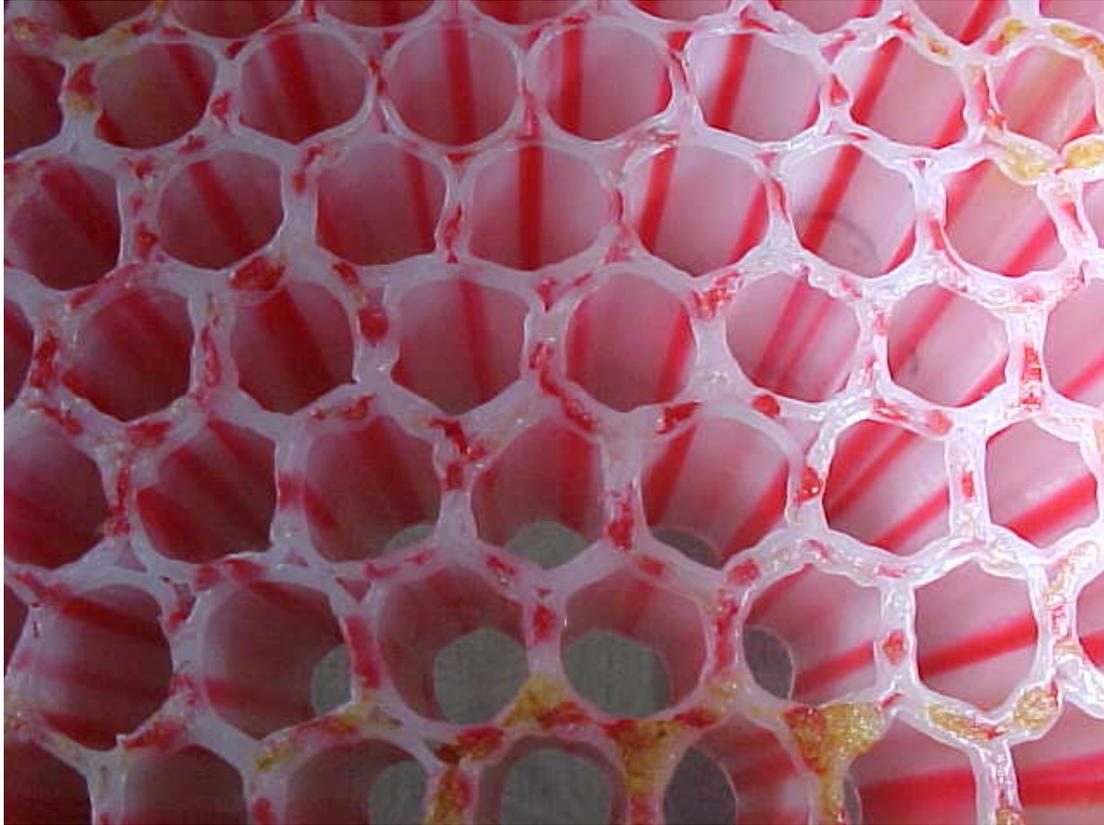


Figura 5.17.- Figura que muestra la unión de las puntas después de ser fundidas y planchadas.

Este método debido que no necesita la elaboración de una máquina de características complicadas, se realizó en pequeña escala un ensayo de este procedimiento. En este se utilizó tubulares de plástico con un diámetro de 6mm y un espesor de 0.03mm, de los cuales la adherencia entre ellos fue muy baja debido a la compatibilidad del material de los popotes y el adhesivo utilizado (UHu).

Dentro de las pruebas que se realizaron a las estructuras elaboradas con tubulares (fig. 5.16) para conocer sus propiedades, nos basamos en el método de prueba MIL-C-7438F en tres ensayos y un cuarto en ensayo de compresión, en el Centro de Diseño y Manufactura utilizando la máquina Instron Series IX, realizando con cuatro diferentes estructuras con dimensiones 90x60x20mm de las cuales: la primera estaba constituida por tubulares unidos solamente por pegamento y papel en una de sus caras, la segunda planchada en una de sus caras, la tercera planchada en sus dos caras cubiertas de papel y la cuarta fue planchada por sus dos superficies y cubierta con papel en sus dos caras.



Fig. 5.18.- Máquina Instron Series IX ubicada en el centro de Diseño y Manufactura CDM

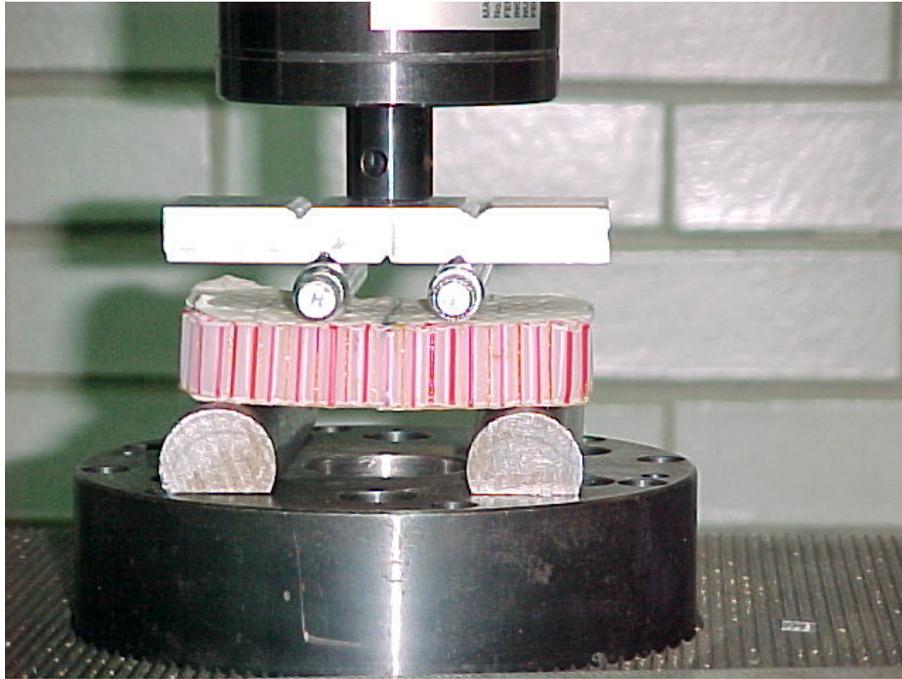


Fig. 5.19.- Prueba MIL MIL-C-7438F realizada en el Centro de Diseño y Manufactura, ensayos realizados a las primeras tres estructuras

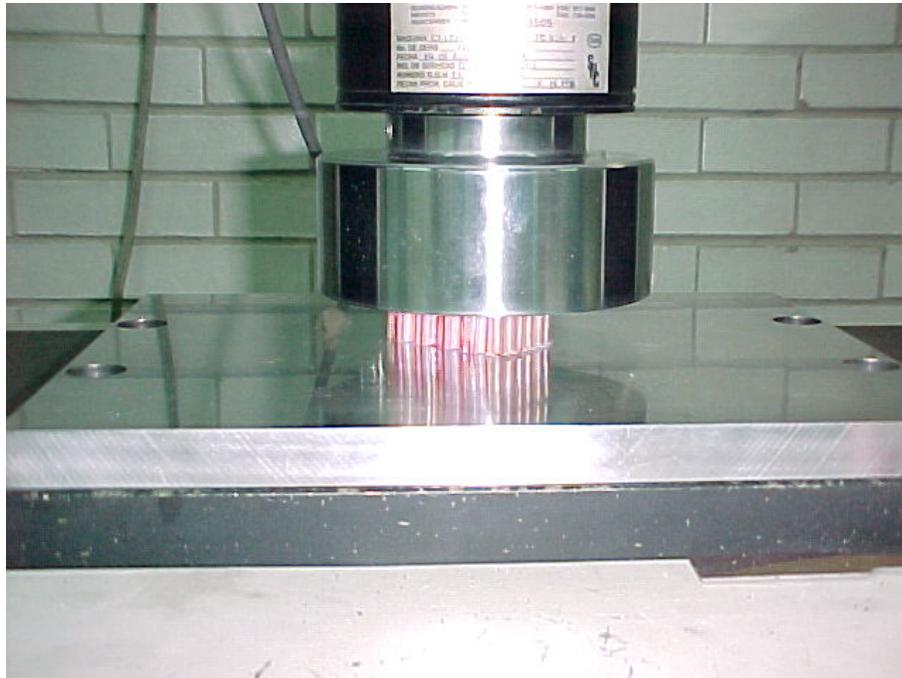


Fig. 5.20.- Ensayo de compresión realizado en el Laboratorio de Pruebas Mecánicas del Departamento de Ingeniería Mecánica a la cuarta estructura.

Los resultados se muestran en las tablas y gráficas siguientes:

Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería Mecánica

A) Prueba de flexión en cuatro puntos para estructura honeycomb bajo norma ASTM C393

Test type: Flex 4 pt. (Support span =2 x Load Span)

Operator name: Adolfo Altamirano M.

Simple Identification Tubulares de simple union (1est test).

Interface Type: 4200 Series

Machine Parameters of test:

Sample Rate (pts/sec): 5.00

Crosshead Speed (mm/min):5.00

Instron Corporation  
Series IX Automated Materials Testing System 1.04  
Test Date: 22 Mar 2002

Sample Type: ASTM

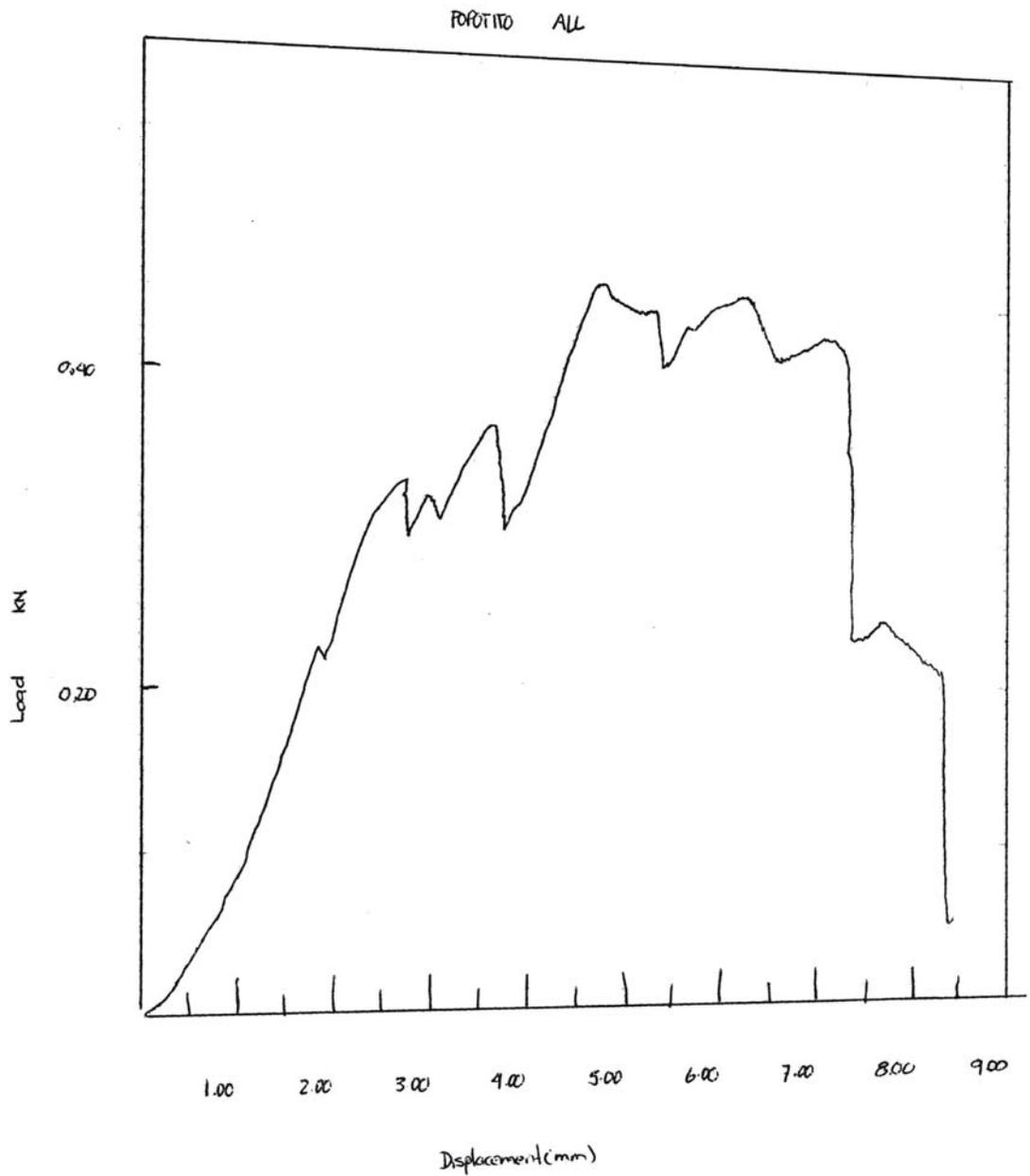
Humidity (%): 50

Temperature (deg. 0) 20

Dimensions: Spec. 1

Width (mm)	60.00
Depth (mm)	19.00
Span (mm)	55.00

	Displcment at yeild	Strain at Yeild	Load at Yeild	Stress at Yeild	Moduls	Load at user Break	Stress at user Break
1est test	4.155	0.1138	0.4635	0.8829	2.344	0.4514	0.8599
Mean	4.155	0.1138	0.4635	0.8829	2.344	0.4514	0.8599
	mm	mm/mm	KN	MPa	MPa	KN	MPa



Gráfica carga (KN)- desplazamiento (mm), obtenida del ensayo de flexión en cuatro puntos.  
Popotes de simple unión

Universidad Nacional Autónoma de México  
 Facultad de Ingeniería  
 Departamento de Ingeniería Mecánica

B) Prueba de flexión en cuatro puntos para estructura honeycomb bajo norma ASTM C393

Test type: Flex 4 pt. (Support span =2 x Load Span)

Operator name: Adolfo Altamirano M.

Simple Identification Tub. Con una de sus caras planchada (2do test)

Interface Type: 4200 Series

Machine Parameters of test:

Sample Rate (pts/sec): 5.00

Crosshead Speed (mm/min):5.00

Instron Corporation  
 Series IX Automated Materials Testing System 1.04

Test Date: 22 Mar 2002

Sample Type: ASTM

Humidity (%): 50

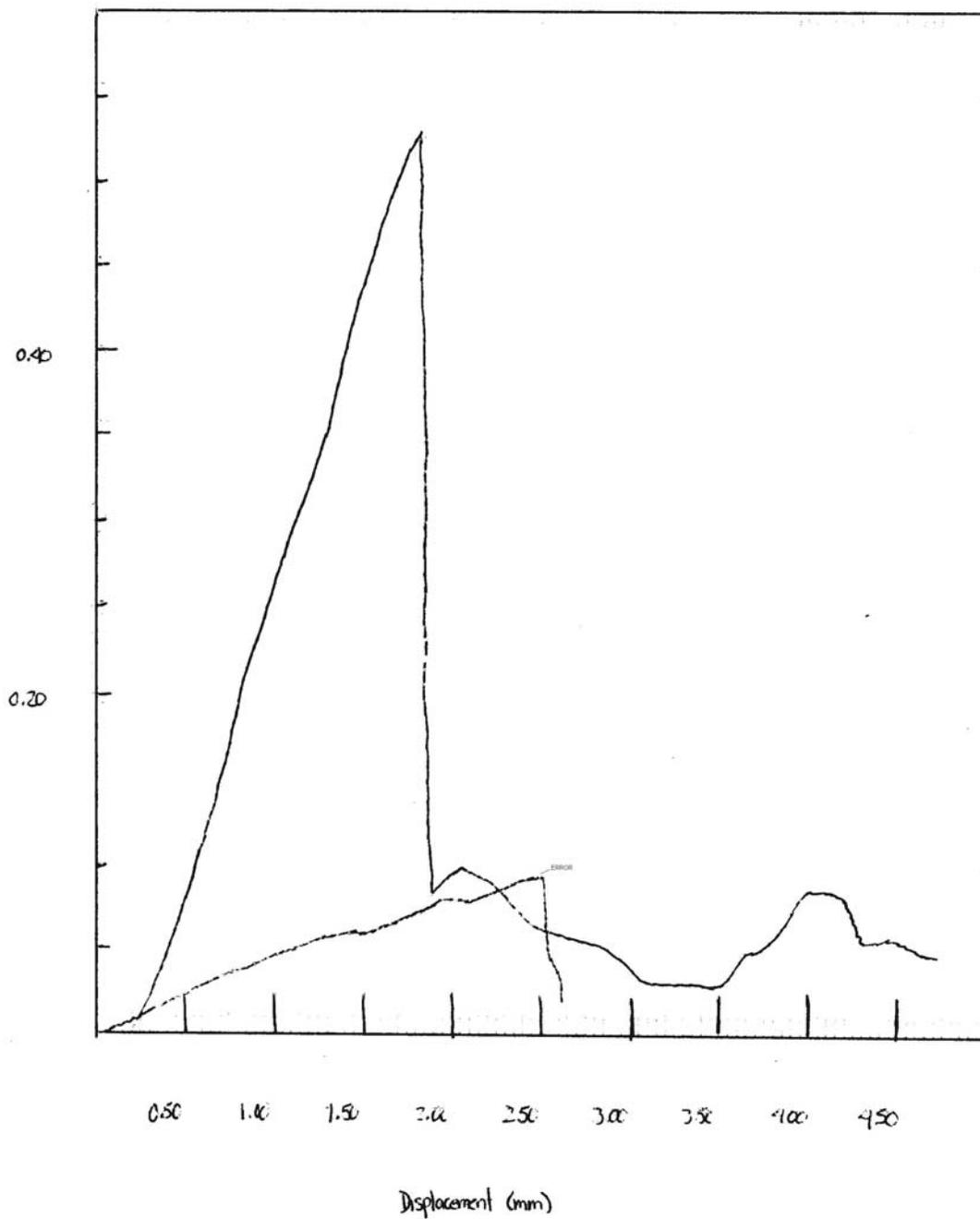
Temperature (deg. 0) 20

Dimensions: Spec. 2

Width (mm)	60.00
Depth (mm)	19.00
Span (mm)	55.00

	Displament at Yield	Strain at Yield	Load at Yield	Stress at Yield	Modulus	Load at user Break	Stress at user Break
2da	1.371	0.0261	0.5291	1.2090	5.796	0.0824	0.1884
Standard deviation	0.768	0.0146	0.3071	0.7020	0.214	0.198	0.0453
	mm	mm/mm	KN	MPa	MPa	KN	MPa

REPETZ ALL



Gráfica carga (KN) desplazamiento (mm), obtenida del ensayo de flexión en cuatro puntos.  
Popotes con una de sus caras planchadas  
(gráfica pequeña es un error obtenido con otra pieza), en el posicionamiento de una pieza anterior).

Universidad Nacional Autónoma de México  
 Facultad de Ingeniería  
 Departamento de Ingeniería Mecánica

C) Prueba de flexión en cuatro puntos para estructura honeycomb bajo norma ASTM C393, COMPRESION TEST

Test type: Flex 4 pt. (Support span =2 x Load Span)

Crosshead Speed (mm/min):10.00

Operator name: Adolfo Altamirano M.

Instron Corporation  
 Series IX Automated Materials Testing System 1.04  
 Test Date: 22 Mar 2002

Simple Identification (3ra) Tubulares Planchada por sus dos caras y hojas de papel y (4ta) Planchada por ambas caras. COMPRESION TEST

Sample Type: ASTM

Interface Type: 4200 Series

Humidity (%): 50

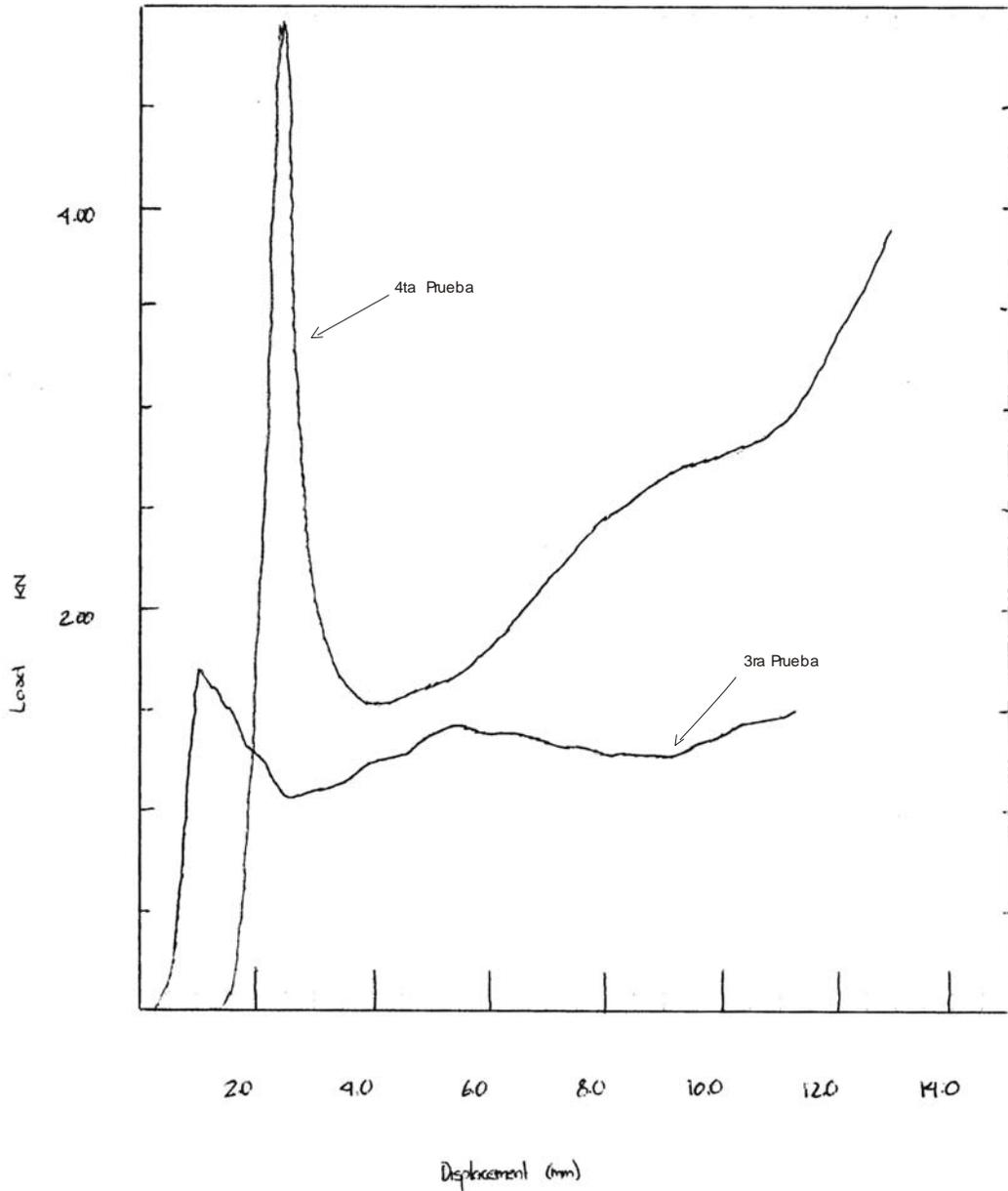
Machine Parameters of test:

Temperature (deg. 0) 23

Sample Rate (pts/sec): 5.00

Dimensions:	Spec. 3	Spec. 4
Area (mm*2)	2400	3600.
Gauge len (mm)	22.00	19.00
Platen Spar (mm)	19.0	19.00

	Load at Maximum	Displace at maximum	Load at Auto. Break	Displace at Auto Break
3er	1.711	.5228	1.434	9.874
4ta	4.941	0.5806	3.624	10.630
Mean	2.219	0.3978		
Standard Deviation:	2.507	0.2681		
	KN	mm	KN	mm



Grafica carga (KN)- desplazamiento (mm), obtenida del ensayo de flexión en cuatro puntos 3ra y en compresión en 4ta. Flanchada en ambas caras

Comparativo de los resultados de las diferentes muestras:

<i>Muestra:</i>	<i>Load at Yeild (kN):</i>	<i>Load at Break (kN):</i>
1) Tubulares de simple unión	0.4635	0.4514
2) Tubulares con una de sus caras planchadas	0.5291	0.0824
3) Tub. con ambas caras planchadas y cubierta de hoja de papel	1.7	1.43
4) Tub. con ambas caras planchadas y papel en las 2 superficies (compresión)	4.94	3.624

Podemos observar la relación directa del incremento de su resistencia al mejorar el tipo de unión en las caras o superficies de las muestras utilizadas.

Un factor importante en este ensayo, es la calidad de corte de las estructuras, el cual se realizó mediante un hilo caliente, en el cual el corte no se realizó de la forma mas uniforme o plana que se hubiera deseado debido al tipo de herramienta utilizada para este fin, provocando un mal asentamiento de los puntos de apoyo de la muestra durante el ensayo, obteniendo esfuerzos adicionales; en el caso de las superficies que fueron planchadas este problema queda anulado debido que cuando se realiza esta operación se corrige la planicidad de la superficie. Esto se refleja directamente en los resultados, como se muestra en el tercer ensayo ya que esta estructura tiene unión de planchado en sus dos caras junto con una cubierta de hoja de papel, adicionalmente a esto tiene un mejor apoyo durante el ensayo distribuyendo mejor los esfuerzos.

Obteniendo los esfuerzos en estos ensayos tenemos:

Para el 4to. ensayo, el esfuerzo a la compresión

$$\sigma = \frac{F}{A}, \quad \text{donde } F = 4.94 \text{ KN}, \quad A = 0.0036 \text{ m}^2$$

por lo tanto  $\sigma = 1372 \text{ KPa}$

Para el 2do. ensayo, el esfuerzo cortante:

$$\sigma_c = \frac{F}{A}, \quad \text{donde } F = 0.529 \text{ KN}, \quad A = 1.045 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

por lo tanto  $\sigma_c = 506 \text{ KPa}$

\*El área tomada es la de sección transversal, también es importante señalar que este esfuerzo es igual tanto en la dirección L y W, debido a que la simetría tanto en L y W es idéntica para celdas circulares.

Comparando los resultados obtenidos con otros materiales, podemos señalar que son muy parecidos a las celdas de papel Kraft (tabla II.d) aunque el tamaño celda de los tubulares es un tanto menor, pero la característica de los tubulares de tener el mismo valor de resistencia en las dos direcciones L y W lo hace muy atractivo a diferencia de los materiales comerciales que como podemos observar la resistencia de menor capacidad (eje W) disminuye hasta un 50% siendo que en los tubulares permanece igual, por lo tanto, ganamos aproximadamente un 50% de resistencia en el eje de menor capacidad.

Datos de la tabla II.d, propiedades ppel Kraft.

Hexagonal Honeycomb	Densidad Nominal $kg/m^3$	COMPRESIÓN		CORTANTE "Plato"			
		ESTABILIZADA		Dirección "L"		Dirección "W"	
		Resistencia	Módulo	Resistencia	Módulo	Resistencia	Módulo
		KPa.	MPa	KPa.	MPa	KPa.	MPa
		Típico	Típico	Típico	Típico	Típico	Típico
Resina impregnada (%)							
KP 1/4-80(11)	80	2758	461	1324	208	593	45
KP 3/8-60(25)	37	1379	310	758	107	414	40
KP 1/2-60(25)	30	896	241	621	83	317	34
KP 1/2-80(18)	30	862	200	483	72	248	26
KP 3/4-80(11)	35	965	234	545	82	283	30

Obteniendo la relación Resistencia-peso de los ensayos mas significativos:

$$\text{Rel resistencia} - \text{peso} = \frac{\text{Resistencia}}{\frac{w}{g} \cdot \text{Vol}}$$

donde  $w$  es el peso,  $g$  es la gravedad y  $\text{Vol}$  es el volumen de la estructura

$$w = 10 \text{ gr}$$

$$g = 10 \frac{m}{s^2}$$

$$\text{Vol} = 1.08 \times 10^{-4} m^3$$

Para popotes con ambas caras planchadas, 1.7KN :

$$\text{Rel. resistencia} - \text{peso} = 0.0183 \frac{KN}{\frac{Kg}{m^3}}$$

Para popotes con una de sus caras planchada, 0.5291KN, 1.2MPa :

$$\text{Rel. resistencia} - \text{peso} = 5.71 \times 10^{-3} \frac{KN}{\frac{Kg}{m^3}}; \quad 0.013 \frac{MPa}{\frac{Kg}{m^3}}$$

Otra característica de este método en la obtención de celdas completamente circulares o cilíndricas, que como ya sabemos, es la estructura con mayor estabilidad y resistencia a cargas sobre todo de compresión. Referente a la resistencia al esfuerzo cortante dependerá de la adherencia entre los tubulares. Si utilizamos tubulares de un tipo plástico y un adhesivo que sean compatibles, se podrá aumentar en manera muy considerable la resistencia al esfuerzo cortante, si utilizamos materiales de cartón o papel y un adhesivo que sea compatible con este, aumentará en gran proporción la adherencia entre ellos en comparación del ensayo realizado anteriormente.

**CONCLUSIONES**

# CONCLUSIONES

## **Comparación entre los diferentes métodos (Ventajas y desventajas).**

Dentro de las ventajas de las primeras cuatro máquinas, está el mejoramiento de la unión de los nodos así como un mejor control de la línea de unión y por consiguiente la obtención de mejores geometrías, como se muestra en la figura 5.2.

De las desventajas, tanto de la máquina de agujerado como la máquina de punzonado (que son muy similares), está la difícil elaboración de los cilindros impulsadores y maquiladores, que contienen tanto las agujas como los punzones.

En todas las máquinas señaladas se está contemplando una sola dirección de las líneas de unión, y solo en el caso de agujerado, como en el de punzonado se puede cambiar esta, pero se necesitan otros cilindros con las disposiciones de los punzones como las agujas en forma radial, por lo que se necesitaría de otro diseño y manufactura completamente diferente de los cilindros.

El método de hilado, solo se recomienda en la utilización de papel o materiales muy maleables, en los cuales se les pueda dar la curvatura necesaria para el mejor pegado de los hilos con la lámina. Otra desventaja del método de hilado, es el de evitar el rompimiento de los hilos ya que son muy delgados, y están constante movimiento.

De estas cinco propuestas, solo las máquinas de agujerado, punzonado y rayado, pueden utilizar métodos posteriores tanto de extensión como de preforma, y en la máquina de hilado solo puede utilizar un método posterior de extensión.

En el método de popotes es muy difícil obtener una buena distribución de los popotes, además de la necesidad de una mayor supervisión. Este método es más de una elaboración manual, además, para obtener la forma del bloque se necesita un procedimiento posterior de manufactura más complicado.

En las máquinas de punzonado, rayado y agujerado, solo se utilizará para materiales como metales (aluminio) o papel Nomex, los cuales son de ciertos espesores y resistencias.

Las máquinas de agujerado y punzonado, pueden utilizar las láminas que se les hallan aplicado una protección o barnizado, solo y cuando esta capa sea de un espesor muy pequeño, a diferencia del método de rayado en que no importa el espesor ya que se puede variar la profundidad del rayado.

La máquina de rayado a diferencia de las otras máquinas, es de fácil elaboración, ya que e los rayadores son muy sencillos a diferencia de los cilindros con sus respectivos agujas y punzones. Además la facilidad de rayar la lámina con poco trabajo, es otra ventaja a diferencia de los otros métodos.

Otra gran ventaja del la máquina de rayado es que además del control de la línea de unión, y la aplicación del adhesivo, limpia la superficie para un mejor pegado, además se pueden tener diferentes rayadores como características deseadas sin tener que hacer grandes cambios en el proceso de elaboración.

Además de estas y otras características, la máquina de rayado es la que cumple con el mayor número de beneficios así como facilidad de elaboración de ésta.

Como pudimos observar, la elaboración y el diseño de materiales tipo honeycomb conlleva un gran número de factores que deben ser contemplados. Desde el tipo de material hasta la geometría de las celdas, la ubicación de éstas referente a la aplicación de las fuerzas a las que será sometido el panel, etc. y así mismo el tipo de proceso para su elaboración.

Todos los procesos de elaboración de materiales tipo honeycomb son muy similares entre sí, así como los problemas o factores negativos que desgraciadamente se reflejan directamente en las características y propiedades del producto final. Por tal motivo nos enfocamos primero a conocer los diferentes procesos de elaboración, así como sus problemas para después plantear soluciones, alternativas para la eliminación de estos.

Dentro de las propuestas se mejoran factores como es el control de la línea de unión, (uno de los grandes problemas), el cual dentro de las diferentes propuestas se aprovecha el efecto de capilaridad que es llevado, controlado por canales, agujeros- hoyos o hilos, obteniendo un control total de la línea de unión, en su tamaño, limpieza, calidad de unión y hasta la característica de

participar como elemento no solo transmisor de los esfuerzos sino como participante de soporte, como se puede observar en nodos tipo remache de la máquina de agujerado.

También se propone una alternativa de elaboración de estos materiales, en un proceso no fuera de nuestro alcance que se pudo llevar a cabo en forma artesanal, el cual sobre todo tiene la característica de tener la geometría de círculo la cual es la más estable y resistente. A los que se le aplicaron ensayos de compresión, obteniendo datos muy atractivos, reflejándose en la característica principal de estos materiales que es la relación resistencia peso. Comparando los valores obtenidos en los ensayos así como su densidad, podemos observar gran similitud al honeycomb de papel Kraft, aun tomando en cuenta que la elaboración de estas no fue la mejor debido a factores como el pegamento, material de los tubulares, que al ser corregidos pueden elevar su resistencia considerablemente.

En cuanto a costo es bajo (100 pesos 1,5 x 1.5 m), debido a que los materiales utilizados y la elaboración de este es muy sencillo, pero la producción en serie de los establecimientos dedicados a la elaboración de este tipo de material no lo hace muy competitivo, por citar un ejemplo un panel de papel Kraft de una área de 1.22 por 2.44 m y ½" in de espesor con una celda hexagonal de 3/8" con una resistencia a la compresión de 26lb/in<sup>2</sup> es alrededor de 70 pesos.

Por tal motivo un factor determinante para ser atractiva la producción en mediante este método, son la propiedades de este material las cuales son mayores, diferentes y en algunas aplicaciones son determinantes.

El Honeycomb, que se encuentra dentro de los materiales compuestos de tipo emparedado no solo tiene las propiedades que los caracteriza como es su gran resistencia en relación al peso, absorción ruido, etc; sino también tiene la capacidad de utilizar materiales reciclables en su elaboración que cada día es mas necesario, no solo por costo sino por el impacto ambiental. Por citar un caso la compañía americana Cascades, elabora un pilar de rollo de material tipo Honeycomb el cual puede resistir hasta 4,500Kg elaborado de material reciclado.

Esto nos da una gran idea de la importancia que esta alcanzando este tipo de materiales así como su aplicación en la industria que será cada día mucho mas viable.

## BIBLIOGRAFIA

## BIBLIOGRAFÍA:

### *Compositie Materials, Design and Aplication.*

Aut: Daniel Gay. Soung V. Hoa  
Edit: CRC PRESS, E.U. 4ta. Edición, 2003  
Pag: 60-67

### *La Ciencia e Ingeniería de los Materiales.*

Aut: R. Askeland  
Edit: Iberoamérica

### *Hand book of Composites.*

Aut: George Lubin  
Edit: Van Nostrand Reinhold, E.U. 1er edit. 1982

### *Diseño de Máquinas.*

Aut: Allen S. Hall. Alfred R. Holowento  
Edit: MacGrawHill,

### *Honeycomb Technology.*

Aut: Bitzer, Tom  
Edit: Chapman and Hall, 1997

### *Composite Manufacturing Technology*

Aut: A.G. Bratukhin.  
Edit: Chapman & Hall. 1ra. Edit. 1995.

### *Materiales Compuestos*

Aut: Antonio Miravete  
Edit: Reverte Ediciones. 1er. Edit. 2000.

### *Composites Manufacturing*

Aut: Sanjay K. Mazumdar.  
Edit: CRC Press. 2da. Edit, 2002.

### *Composites Material, Engering and Science.*

Aut: F.L. Marthews and R.D. Rawlings.  
Edit: CRC Press, 2da edit, 1999.