



**Sistemas estructurales con
tubos de cartón para su uso
en obras de arquitectura
temporal en Córdoba**

Autora: Arq. Yohana Cicaré
Directora: Esp. Ing. Gabriela Culasso

Trabajo final de
Especialización de diseño estructural de obras de arquitectura

Sistemas estructurales con tubos de cartón para su uso en obras de arquitectura temporal en Córdoba

Palabras claves: Estructuras de barras, Estructuras de cartón, Arquitectura temporal, Estructura sostenible

Autora: Arq. Yohana Cicaré
Directora: Esp. Ing. Gabriela Culasso

In-

di-

ce

ÍNDICE

CAPITULO 1: Fundamentación	09
CAPITULO 2: Tubos de cartón como material para la construcción	14
El cartón	16
Características técnicas de los tubos de cartón	21
Impermeabilización	24
Resistencia al fuego	24
Sostenibilidad ambiental	25
Conclusiones	27
CAPITULO 3: Sistemas de vector activo	28
Sistemas Estructurales	30
Estructuras de vector activo	32
Uniones de estructuras trianguladas	33
Ventajas y desventajas	36
Conclusiones	36
CAPÍTULO 4: Arquitectura temporal: casos de estudio	39
Arquitectura temporal	40
Casos de estudio	
Papel log: Viviendas en Kobe	42
Estudio temporal de papel en el Pompidou	46
Escuela primaria temporal en Hualin	50
IE Paper Pavilion	54
Conclusiones	57
CAPÍTULO 5: Diseño de prototipo estructural modular	58
Prototipo estructural modular con tubos de cartón adaptables y flexibles	60
CONCLUSIONES	68
BIBLIOGRAFÍA	70

CAPÍTULO

01

Fundamentación

Fundamentación

El conjunto de elementos que configuran un objeto arquitectónico, vinculados entre sí, capaces de resistir y transmitir cargas al terreno se denomina sistema estructural.

Moisset de Espanés (2000) menciona en su libro *Intuición y razonamiento estructural* que “los tipos estructurales de mayor eficiencia son aquellos en que se elimina la flexión y el trabajo interno es fundamental o exclusivamente, de tracción o de compresión.”

Los sistemas estructurales que se caracterizan por tener un comportamiento como el mencionado anteriormente se denominan sistemas de vector activo. Estos se encuentran configurados por barras, formando triángulos y vinculadas mediante articulaciones. Las barras tubulares de sección circular o cuadrada constituyen la forma geométrica más eficiente frente a este tipo de esfuerzos y pueden ser realizados con diferentes materiales, entre los cuales me interesa explorar las de cartón.

El Arquitecto Shigeru Ban, ganador del premio Pritzker 2014 es un precursor y referente en estructuras con tubos de cartón o papel. Sus investigaciones sobre el material comenzaron en 1986 y hoy en día es reconocido a nivel mundial por el uso del cartón principalmente para la construcción de viviendas de emergencia.

Los grandes desafíos de trabajar en arquitectura con materiales biodegradables radican especialmente en su escasa vida útil pero sobre todo, en la poca aceptación social que puede llegar a tener si la propuesta fuera más allá de lo temporal.

La arquitectura temporal o efímera enmarca a proyectos pasajeros, realizados para que permanezcan en pie durante un corto plazo. Entre ellos se pueden encontrar pabellones, viviendas de emergencia, stands, escenarios lúdicos, instalaciones museísticas, etc. En la conferencia de TED Talks en Tokio del 2013, Shigeru Ban habla sobre la diferencia entre la permanencia o temporalidad de una obra de arquitectura, destacando que fundamentalmente la misma se encuentra en su aceptación social, ya que muchas veces, una obra es pensada para ser temporal y se convierte en permanente debido a la apropiación por parte de la comunidad. No obstante, no solo depende de dicha aceptación, sino que también de la calidad de la construcción, la resolución de las uniones, la correcta impermeabilización, la resistencia del material utilizado, entre otros y de una serie de factores relacionados con la localización del proyecto y el clima local (Jodidio, 2011). Por ello para poder establecer si es factible o no el uso de este material en la construcción, es necesario conocer sus ventajas y limitaciones, pero también su disponibilidad en el medio donde se realizará la obra, en este caso, la ciudad de Córdoba, así como los métodos y técnicas disponibles para su utilización.

Existen estudios realizados por Ban en la Universidad de Waseda en Tokio (McQuaid, 2006), en los cuales se sometió a los tubos de cartón a una serie de experimentos con el propósito de determinar el efecto a largo plazo de una carga axial constante sobre el mismo, en los que se concluyó que los tubos de cartón tienen una resistencia a compresión mayor que la de la madera

pero una rigidez mucho menor. Por lo tanto, esto permite su uso como material estructural siempre que se controlen las deformaciones.

Para demostrar la versatilidad de este material, entre las obras del arquitecto Shigeru Ban, se pueden observar diferentes configuraciones estructurales, tales como las viviendas temporales en Kobe, Japón, que se realizaron en el año 1995 tras un terremoto en el cual cientos de personas quedaron sin hogar. En este caso el arquitecto planteo una estructura indiferenciada de la envolvente, en la que los muros portantes estaban formados por tubos de cartón de 108 mm de diámetro y 4 mm de espesor, asentados sobre cajones de cerveza llenos de arena, logrando de esa forma aislarlos del terreno. De la misma manera, existen referencias de otros proyectos, donde Ban plantea una estructura diferenciada de la envolvente en la cual los tubos de cartón actúan como columnas y vigas del sistema resistente y las envolventes se materializan con otros materiales como las telas, donde el mayor desafío lo constituye el diseño de la estabilidad de la obra la cual es lograda mediante la utilización de cuerdas de nylon que funcionan como tensores. En La Biblioteca de un poeta, la estructura no solo utiliza el mismo material de los libros que serán contenidos por ella, sino que además, combinando el cartón con otros materiales como el acero, propone configuraciones de pórticos reticulados en las dos direcciones.

Sobre las ventajas de la utilización de tubos de cartón en la estructura resistente de un objeto de arquitectura, Sánchez Campos (2010) menciona ser económico, tener buena relación entre resistencia y peso, y ser reciclable, logrando un bajo impacto medioambiental. Entre las desventajas además de su poca rigidez, podemos mencionar que son extremadamente vulnerables a la infiltración de agua, por lo cual, deben tratarse con materiales sellantes, tales como los procesos de parafinado (McQuiad, 2003). Por todo lo mencionado anteriormente y teniendo en cuenta que los tubos de

cartón son desechos de otras industrias, como la textil, por ejemplo, pensando en su reuso, es que las arquitecturas desarrolladas con este material pueden considerarse sostenibles. Estas construcciones, que permiten el rápido ensamblaje de sus partes, un ágil desmontaje y la posibilidad de reformularse para futuras construcciones, refuerzan este concepto.

En la ciudad de Córdoba se encuentra la fábrica de tubos de cartón CONAM, en la cual se elaboran tubos con más de 300 diámetros internos diferentes desde los 12 mm hasta los 560 mm, con espesores que van de 0,8 mm hasta 20 mm.

Con respecto a las políticas sobre el reciclaje del material de descarte en la ciudad, actualmente el municipio cuenta con centros verdes en los cuales se recuperan residuos recolectados, constituyéndose un medio para la acogida y clasificación de tubos.

Es sabido que el diseño estructural debiera ir de la mano del diseño arquitectónico para poder garantizar compatibilidad, coherencia, factibilidad y eficiencia (Simonetti y Fabre, 2015) y que es el arquitecto, en su rol de diseñador, el único responsable para que se cumplan estos parámetros. Shigeru Ban muestra en sus obras una correcta concepción de la arquitectura, donde el diseño estructural es configurante del diseño arquitectónico con una clara concepción de su mecanismo resistente y un conocimiento acabado del material y las técnicas constructivas asociadas para su puesta en obra. Es por ello que, a partir del estudio realizado, se considera relevante investigar si es posible la construcción de arquitecturas temporales en Córdoba con tubos de cartón.

Interrogante orientador:

¿Es factible el planteo de sistemas estructurales con tubos de cartón en Córdoba para su uso en obras de arquitectura temporal?

Hipótesis:

Los antecedentes existentes de construcciones que utilizan los tubos de cartón para proyectos de arquitectura temporal son variados. El fácil acceso al material, su transportabilidad y poco peso, y la posibilidad de plantear estructuras sistematizadas y geométricamente determinadas lo convierten en un material posibilitante para el planteo de arquitecturas temporales en Córdoba.

Objetivos:

Generales:

Generar sistemas estructurales con tubos de cartón que permitan materializar proyectos de arquitectura temporal en la ciudad de Córdoba.

Particulares:

- 1) Estudiar los tipos estructurales y técnicas constructivas de las obras realizadas con tubos de cartón del arquitecto Shigeru Ban.
- 2) Relevar la disponibilidad de tubos de cartón en Córdoba y los diferentes tipos de impermeabilización disponibles en el mercado.
- 3) Generar sistemas estructurales modulares con tubos de cartón adaptables y flexibles y determinar su comportamiento estructural y capacidad resistente.
- 4) Diseñar uniones compatibles con el mecanismo estructural propuesto.
- 5) Elaborar conclusiones

Metodología, técnicas y plan de actividades:

1er Etapa:

- Elaboración teórico- conceptual
- Búsqueda de bibliografía sobre el tema abordado. Desde el funcionamiento estructural del material hasta las diferentes resoluciones constructivas.
- Análisis de obras.
- Relevamiento de la disponibilidad del material en la ciudad de Córdoba
- Estudio de métodos existentes en nuestro medio para la impermeabilización de los tubos de cartón.

2da Etapa:

- Diseño de módulos estructurales para el desarrollo de un objeto arquitectónico de pequeña escala.
- Diseño de diferentes tipos de uniones.
- Desarrollo de un prototipo de nudo a escala 1:1 con el fin de comprobar la factibilidad y facilidad del montaje del sistema diseñado.

3ra Etapa:

- Elaboración de las conclusiones.

CAPÍTULO

02

**Tubos de cartón como
material para la construcción**

“...Prefiero los tubos de cartón porque son muy baratos y se pueden conseguir prácticamente en cualquier parte del mundo, sin embargo, son difíciles de usar.

No utilizo la totalidad de su estructura; además, a diferencia de otros materiales que te permiten conseguir cualquier forma, los tubos de cartón son mucho menos flexibles; tienes que ser más creativo para lograr la composición ideal.”

Shigeru Ban

Tubos de cartón como material para la construcción

El cartón:

El cartón es sumamente versátil y en nuestro medio se encuentra en diversos formatos: compacto, corrugado, acanalado y en forma de tubos.

Este material es utilizado en cajas contenedoras de diferentes productos, embalajes, tapas de cuadernos, libros y revistas y también como elementos de soporte que permiten envolver telas, papel film, rollos de papel absorbente, etc.

No es un material compuesto, ya que es fabricado únicamente con pulpa de papel, fresca o reciclada, por lo tanto puede decirse entonces, que el cartón es un tipo de papel más pesado y más duradero.

Es por esto que, el origen del cartón se encuentra ligado al del papel. Este se remonta al año 105 dC. en China, cuando se comenzó a producir utilizando tela usada, corteza de árbol y redes de pesca. Llega al mundo árabe en el año 751 dC. a través de dos papeleros chinos que habían sido secuestrados por el gobernador de Samarcanda. Con sus conocimientos, se pudo montar una fábrica papelera en la ciudad usbeka, en la cual se disponía de gran cantidad de cáñamo y lino, materia prima fundamental para la elaboración. La producción se difundió a otras ciudades de Asia, en particular a Bagdad y Damasco.

El papel recién llegó a Europa en el siglo XI, con las invasiones árabes en Sicilia y en España (Cantevalle, 2019.)

A medida que la industria fue evolucionando, se pudo comenzar a fabricar papeles de mejor calidad, lo que permitió la producción del cartón, un papel de mayor espesor y de mayor rigidez.

El origen de las primeras cajas de cartón data de 1817

en Londres bajo la firma de M. Treverton & Son.

Tubos de cartón, proceso de fabricación:

Para la elaboración de los tubos de cartón, la materia prima llega a la planta de fabricación, en forma de rollos de papel kraft (papel madera). Estos son rebobinados hasta obtener cintas que se utilizarán para la producción de los tubos. Son sometidos a un estricto control de calidad. Allí se corrobora que la humedad, resistencia y constitución de la materia prima sean óptimas para garantizar la calidad del producto.



Figura 1: Rollos de papel kraft

Fuente: https://cdn.shortpixel.ai/client/to_webp,q_glossy,ret_img,w_1024/https://www.tubosesbert.com/wp-content/uploads/2019/03/proceso_1.jpg

Es muy amplia la variedad de espesores, largos y calidad de tubos que pueden construirse. En algunas fábricas de Argentina, como Cartonería San José de Lanús o CONAM en la ciudad de Córdoba, se fabrican tubos con más de 300 diámetros diferentes desde los 12 mm hasta los 560 mm, con espesores que van de 0,8 mm hasta los 20 mm. La definición del espesor y diámetro depende del destino del tubo.



Figura 2: Tubos de cartón de diferentes diámetros
Fuente: <https://www.papeleraberazategui.com/tubos-de-carton/>

El tubo de cartón está formado por una superposición de capas de cintas de cartones que se enrollan sobre un mandril de forma helicoidal a las que previamente se les aplica adhesivos y cierta tensión para poder lograr que las paredes del tubo sean más o menos compactas. Tanto las cintas de cartón como los adhesivos y la tensión que se utiliza en el enrollado depende del destino de uso del tubo de cartón, por ejemplo, no tiene la misma calidad y terminación uno destinado a papel film que uno destinado a telas.



Figura 3: Proceso de fabricación de los tubos de cartón
Fuente: https://cdn.shortpixel.ai/client/to_webp,q_glossy,ret_img,w_1903/https://www.tubosesbert.com/wp-content/uploads/2019/03/PROCESO-Banner.jpg

Los tubos de mayor espesor son colocados en hornos de secado para estabilizar la humedad y lograr mayor resistencia.

Durante la fabricación, los tubos son testeados en un laboratorio de control de calidad. Allí se les realizan ensayos de absorción o cobb¹, desgarramiento, compresión radial y resistencia a la flexión y humedad.

Como terminación final, estos pueden estar forrados tanto en su parte interior como exterior, con diversos tipos de papeles como ser: sulfito, kraft, ilustración, aluminio, etc., y pueden ser plastificados y termosellados, procesos que aumentan de manera exponencial su costo.

Estos tubos son comercializados por cantidad, siendo 500 tubos la menor compra que puede realizarse.



Figura 4: Control de calidad

Fuente: <https://www.papeleraberazategui.com/tubos-de-carton/>

Tablas 1 y 2: precios de tubos por cantidad según las principales productoras locales

DIAMETRO INTERIOR	ESPESOR	LARGO	CANTIDAD	PRECIO
40,2mm	10 mm	1.000 mm	500/1.000	\$ 197.- + IVA c/u*
78,5mm	10 mm	1.500 mm	500/1.000	\$ 535.- + IVA c/u*

*Valores proporcionados por cartonería San José (marzo 2021)

DIAMETRO INTERIOR	ESPESOR	LARGO	CANTIDAD	PRECIO
40 mm	10 mm	1.000 mm	500/1.000	\$ 165 c/u**
77 mm	10 mm	1.500 mm	500/1.000	\$ 461.25 c/u**

**Valores proporcionados por CONAM (marzo 2021)

¹ Ensayos de Cobb: permiten medir la cantidad de líquido que penetra en una hoja de papel y cartón.

Es importante destacar que, si bien estos tubos pueden fabricarse a pedido, existen múltiples industrias en la ciudad de Córdoba que los descartan. Por lo tanto, pensar en la reutilización de los mismos permitiría una reducción sustancial de costos.

Usos de los tubos de cartón en la construcción:

El uso más común de estos tubos en la construcción es, en su mayoría, como encofrado de columnas o como revestimiento de interiores.



Figura 5: Encofrado de columna de hormigón

Fuente: <https://www.elcomercio.com/tendencias/construir/arquitectura-encofrado-materiales-construccion.html>

Su utilización como elemento resistente fue introducido por el arquitecto ganador del Pritzker, Shigeru Ban.

Las secciones de los tubos de cartón utilizadas por Shigeru Ban varían según el destino del proyecto. Los tubos de menor diámetro y espesor de paredes son los que utiliza en los refugios temporales realizados en distintas partes del mundo como Kobe y Haití, que tienen 108 mm de diámetro y 4 mm de espesor.



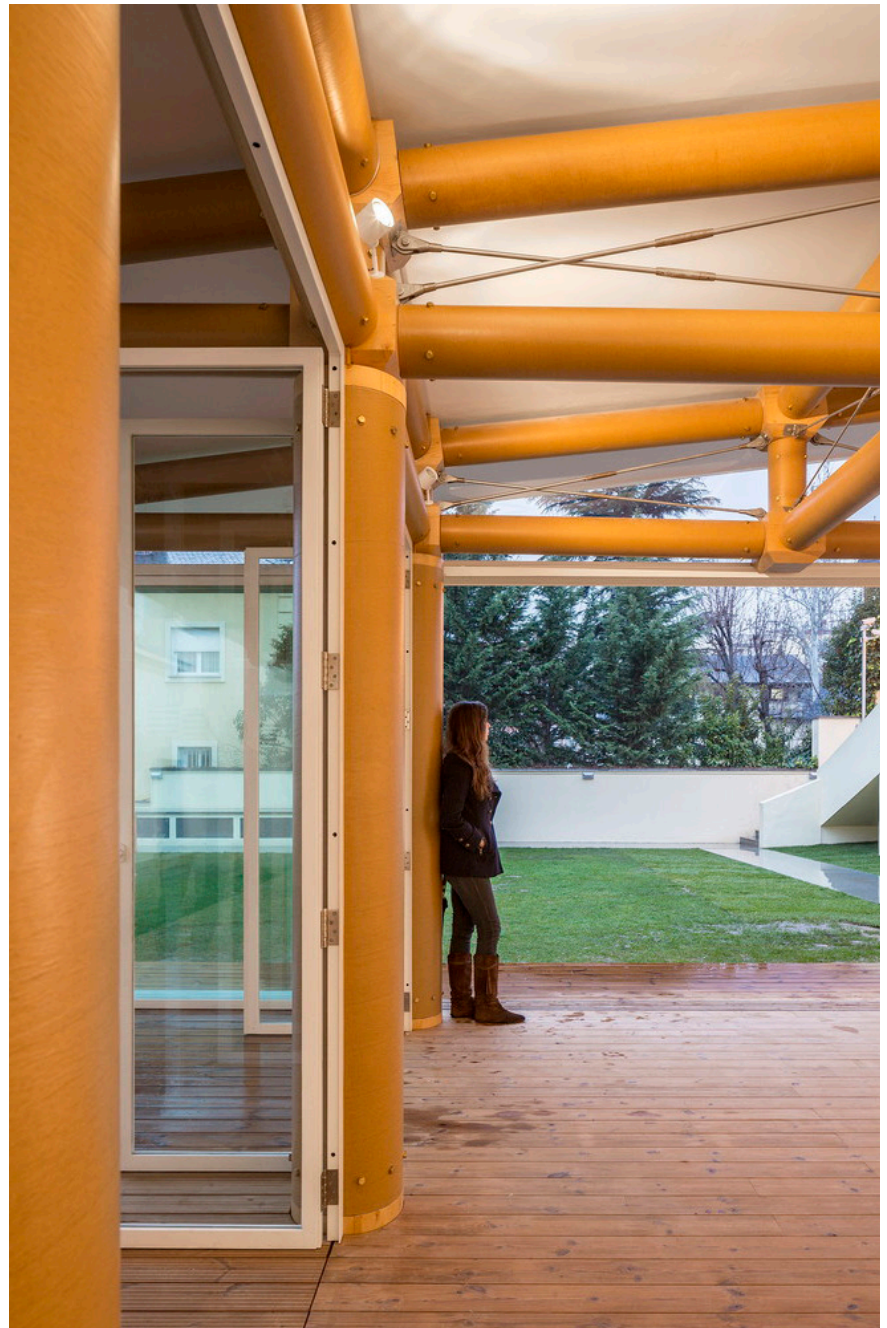
Figura 6: Refugios de emergencia en Haití, 2010

Fuente: <https://arquitecto.com/wp-content/uploads/2014/03/Estructuras.jpg>

A medida que aumenta la complejidad del programa varían las dimensiones utilizadas, como por ejemplo en el caso de la Biblioteca de un Poeta, donde utiliza tubos de 100mm de diámetro y 12,4 mm de espesor y el Pabellón de Madrid con tubos de 230 mm de diámetro. El estudio de algunas obras singulares de Shigeru Ban se profundizará en un capítulo posterior.



Figura 7 (superior): Biblioteca de un Poeta, 1990
Figura 8 (derecha): Pabellón IE de Madrid, 2013
Fuente: Jodidio, P., & Ban, S. (2015). Shigeru Ban: complete works 1985-2015. Taschen.



Características técnicas de los tubos de cartón

Los tubos de cartón son barras, es decir que sus dimensiones transversales son significativamente menores que su longitud.

Es por esto que, para este tipo de piezas, las características mecánicas principales que nos interesan conocer son la resistencia a compresión, tracción, flexión y módulo de elasticidad .

Estudios realizados sobre el material arrojan los siguientes resultados:

1) Ensayos técnicos realizados por Shigeru Ban (Salado, 2006)

Tabla 3: Resultados de ensayos de compresión y flexión

Fuente: Salado Gerusa "Tesis doctoral: Painei de vedação vertical de tubos de papelão: estudo, proposta e análise de desempenho"

Ensayos	Proyecto	Dimensiones de los cuerpos de prueba	E (Kg/cm ²)	fc/fb máx (Kg/cm ²) (a rotura)	Tensión de diseño de referencia a compresión (Kg/cm ²)(*)
Resistencia a compresión	Biblioteca de papel	100 x 12,5 x 400	18600	101,2	70,84
	Casa de Papel	280 x 15 x 600	24100	111,7	78.19
	Domo de papel	280 x 15 x 600	21100	97,4	68.18
	Pabellón de Japón	100 x 22 x 240	15800	95,3	66.71
Resistencia a flexión	Biblioteca de papel	Sin ensayo	Sin ensayo	Sin ensayo	-
	Casa de Papel	280 x 15 x 4000	22200	158,2	-
	Domo de papel	291 x 20,5 x 1758	21500	149,1	-
	Pabellón de Japón	100 x 22 x 2000	14600	145,2	-

(*) Tensión obtenida reduciendo la tensión máxima a compresión un 30% a partir de la información brindada por los ensayos realizados por Ban, en los que aclara que el material comienza a tener deformaciones visibles al 88% de la tensión máxima de compresión.

En la tabla 3 puede observarse la tensión en compresión, la tensión a flexión y el módulo de elasticidad de tubos de cartón de diámetros (medido a 1/3 de la carga máxima resistida a compresión) y espesores variables que utilizó Ban en cuatro obras de diferentes años.

Si comparamos la resistencia en compresión de los tubos de cartón obtenida de estos estudios con la del pino Paraná, podemos observar que este último tiene una resistencia de 63 kg/cm² (Tabla 4) mientras que el tubo de cartón ronda entre los 70,84 kg/cm² y 66,71 kg/cm² (Tabla 3), por lo que su resistencia es levemente mayor.

Tabla 4: Tensiones de diseño, módulo de elasticidad, y pesos específicos de maderas aserradas
Fuente: Simonetti y Fabre (2017).

Especie	E (Kg/cm ²)	F'c (kg/cm ²)
Pino Paraná	77000	63
Pino Tadea y Eliotis	43000	45
Eucaliptus grandis	72000	66

Al analizar el módulo de elasticidad, podemos concluir que su rigidez promedio es casi 1/4 parte de la del pino Paraná, sufriendo así mayores acortamientos.

Los tubos de cartón además de sufrir acortamientos debido a la carga, por la forma en la que fueron fabricados (capas de papel enrolladas de forma helicoidal) sufren

torsiones que provocan a su vez desplazamientos laterales.

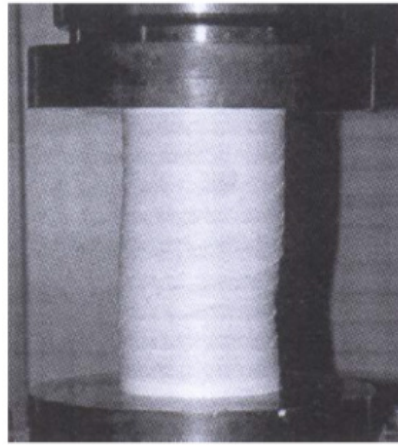


Figura 9: Deformación de una probeta por compresión en la sección transversal
Fuente: McQuaid, 2003

Con respecto a la resistencia en flexión puede observarse en la tabla 3 que fue mayor que la resistencia en compresión. Pero el módulo de elasticidad fue menor al valor obtenido en el ensayo de resistencia a compresión, por lo que, a flexión, este material sufre mayores deformaciones.

En los ensayos se pudo observar también, que la rotura global del cuerpo de prueba se originó luego de la falla local del área comprimida llevando a una rotura repentina de la zona traccionada.

En los estudios que fueron realizados en la Universidad de Dortmund en Alemania para el Pabellón Japonés de la Expo 2000 (Correa, 2004), cuyas exigencias debido a la escala eran mayores, se estudió también la

deformación a largo plazo (un año), obteniendo valores significativamente menores de resistencia en compresión y menores de módulo de elasticidad.

Para obtener datos sobre la resistencia al corte en las uniones, se realizaron ensayos para el Domo de papel. En estos ensayos se colocó un taco de madera por dentro del tubo el cual fue fijado mediante tornillos, dejando parte del taco de madera por fuera del mismo, unos 3 mm (Figura 10), para que funcione como plano de compresión en la base. En esta base se aplicó la fuerza y por medio de los tornillos, se la transfirió a las uniones con el tubo, sometiénolas a corte. La resistencia a corte obtenida en la unión fue de 2140 kg por tornillo (Salado, 2006).

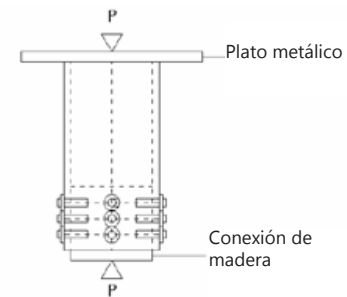


Figura 10: Dibujo esquemático del ensayo de resistencia a corte en la unión para el Domo de papel.

Fuente: Salado, 2006

2) Ensayos realizados por Gerussa Salado:

Además de los ensayos realizados por Ban, que fueron ejecutados en Japón y en Alemania, la arquitecta Gerusa Salado efectuó para el desarrollo de su tesis de maestría y luego de doctorado pruebas del material en Brasil.

Tabla 5: Resultados de ensayos de compresión.
Fuente: Gerusa Salado "Tese: Panel de vedação"
(2006)

Resistencia a compresión			
Cuerpos de prueba	Diámetro externo y espesor	P_{máx} (Kg)	f_c máx (Kg/cm²) (a rotura)
1	193 x 20	8427	78
2	193 x 20	8779	80
3	193 x 20	8492	77
Media	193 x 20	8566	78
4	173 x 11	4282	75
5	173 x 11	4357	76
6	173 x 11	4373	76
Media	173 x 11	4337	76
7	162 x 04	1273	55
8	162 x 04	1190	51
9	162 x 04	1294	57
Media	162 x 04	1254	54

La autora realizó ensayos en 9 tubos de 150 mm aproximadamente de diámetro interno con espesores de 4 mm, 11 mm y 22 mm.

Los resultados obtenidos a compresión varían según el espesor de pared del tubo, obteniendo una resistencia de 54 kg/cm² en los de 4 mm, 76 kg/cm² en los de 11 mm y 78 kg/cm² en los de 20 mm. Lamentablemente no se realizaron mediciones para definir el módulo de elasticidad.

Al compararlos con los ensayos realizados por Ban puede observarse que los tubos ensayados en Brasil tienen una resistencia menor.

Impermeabilización:

Los tubos de cartón al ser su componente principalmente el papel, son sensibles al agua y a la humedad. Para controlar los efectos que pueden producir sobre los mismos, producto de su exposición, existen diferentes métodos de protección del material. Se pueden mencionar el laminado del cartón con una película de polietileno de baja densidad, procesos de parafinado (baño de cera), recubrimiento de cortina (pulverización con barniz), etc. En fábricas de tubo de cartón de Argentina, se puede solicitar que los tubos sean plastificados o termosellados según el uso o el destino que tengan los mismos.

Es importante tener en cuenta que no todos los tubos cuentan con el mismo tratamiento, y que si para construir se va a reutilizar tubos de cartón desperdiciados por otra industria se deberá chequear si el mismo se encuentra plastificado o no, o si esa película se encuentra dañada.

En caso de no encontrarse plastificado, se deberá realizar algún tratamiento aplicando uno de los métodos mencionados anteriormente, ya que el cartón debe ser protegido al igual que la madera para evitar la degradación debido a la acción de agentes exteriores.

El tratamiento más común por las costumbres locales y por la facilidad de aplicación es la utilización de barniz en spray.

Resistencia al fuego:

El comportamiento al fuego de los tubos de cartón es similar al de los entramados de madera (Correa, 2004).

Existen ensayos realizados por Ban (McQuiad, 2003) en los que el material fue clasificado como DIN 4102 B2¹, normalmente inflamable ya que el material se quema a una velocidad normal.



Figura 11: Pruebas de resistencia al fuego DIN

Fuente: <https://www.eurolab.com.tr/es/sektorel-test-ve-analizler/yapi-malzemele-ri-testleri/din-4102-alman-standardlari-yan-gina-dayanim-testleri>

¹ DIN 4102 B2: Se aplica en el cuerpo de prueba una llama. El tiempo para alcanzar el punto marcado por la misma es por lo mínimo 20 segundos. El papel no entra en combustión. Las gotas son abrasadoras por un máximo de 2 segundos.

Es posible aplicarle recubrimientos intumescentes a la superficie del cartón con el fin de aumentar su resistencia al fuego.

En la obra Pabellón Japonés, por pedido del comitente al temer ataques terroristas, Ban aplico una membrana reforzada con fibra de vidrio y un film laminado incombustible de polietileno.

Sostenibilidad ambiental²:

La creación del papel implica la tala de árboles y como consecuencia una gran deforestación. Si bien muchas de estas plantaciones son realizadas para tal fin, es imposible no pensar en los especuladores, que en muchos casos no reforestan o lo que es mucho peor, extienden sus plantaciones más allá de lo permitido, eliminando el bosque nativo.

En el caso del papel Kraft que es el que se utiliza para realizar los tubos de papel, generalmente se obtiene del reciclaje, por lo tanto utiliza celulosa de materiales descartados y a su vez puede volver a ser reciclado en varias oportunidades, es por ello que es considerado un material sostenible, de bajo impacto ambiental.

Según el post "Como funciona el reciclaje de cartón" del blog RajaPack, al reciclar una tonelada de cartón, se ahorran dos metros cúbicos de vertedero, 50000 litros de agua, 140 litros de petróleo y la emisión de 900 kilos de dióxido de carbono. A su vez, salva cerca de 17 árboles de la tala y ahorra más de 4.000 horas de electricidad.

Si bien los tubos pueden fabricarse a partir del reciclaje del papel, ese producto también se puede obtener mediante la reutilización de tubos descartados de industrias como las textiles, gastronómicas, etc., sin necesidad de producir papel nuevo para el mismo.

Es por ello que sería valiosa la creación de una red de recolección de estos desechos, que permita la selección y clasificación de los mismos para poder ser reutilizados y/o reciclados.

En la actualidad existe en la municipalidad de Córdoba el ente COyS (Córdoba Obras y Servicios), que entre otros servicios se encarga de los Centros Verdes, que recuperan y reutilizan muchos de los residuos de la ciudad, tales como: material celulósico, vidrios, metales, PET y poliestireno expandido. Este trabajo lo realizan junto con cooperativas que nuclean a más de 200 familias.

De todos estos materiales, actualmente el PET es el que reciclan para la creación de lo que denominan "madera plástica", y es utilizado para la construcción de bancos de plaza, maceteros, palos de escoba, etc. El resto de los materiales son vendidos en "eco-subastas".

Dentro de estos Centros Verdes es muy factible la creación de un espacio que permita el acopio, selección y clasificación, según tamaño y espesor, de tubos de cartón para ser reutilizados.

² La sostenibilidad ambiental se obtendrá siempre y cuando la explotación de los recursos naturales se mantenga dentro de los límites de la regeneración y el crecimiento natural, a partir de planear la explotación de los recursos y de precisar los efectos que la explotación tendrá, sobre el conjunto del ecosistema

**“Creo que para construir un edificio sólido no hace falta usar un material resistente.
La solidez de un edificio no tiene nada que ver con la resistencia del material”**

Shigeru Ban

Conclusiones:

Para concluir con este capítulo considero relevante destacar las principales ventajas y desventajas de los tubos de cartón para su uso como material constructivo:

Tabla 6: Ventajas y desventajas de los tubos de cartón
Fuente: Elaboración propia

Ventajas	Desventajas
Es un material que puede ser considerado como sostenible debido a que se obtiene del reciclado de papel y también puede ser reutilizado de los desperdicios de otras industrias.	Es sensible a la duración de la carga, en construcciones a largo plazo, este material sufre grandes deformaciones.
Es un material liviano, fácil de trasladar.	Al igual que la madera o la guadua, es un material que debe protegerse de la acción del agua para evitar su deterioro.
Es un material mucho mas barato que la madera.	Sufre grandes deformaciones, siendo mas grandes a flexión que a compresión.
Existen antecedentes de su uso como material de construcción, principalmente para construcciones temporales	No se dispone de ensayos realizados de tubos de cartón en nuestro medio.
La impermeabilización de los tubos no es más compleja que la de la madera.	Tiene una rigidez de aproximadamente a 1/4 parte de la del pino Paraná
Se pueden conseguir tubos de variadas secciones transversales y espesores de pared según los requerimientos de resistencia.	

CAPÍTULO

03

**Sistemas estructurales de
vector activo**

“Cada material posee un conjunto de características propias que lo hacen más o menos apto para un tipo de construcción o parte de ella, para uno u otro proceso constructivo, para una forma de sollicitación mecánica, etc. Las características propias de cada material influyen, pues, en el tipo estructural que se ha de elegir.”

Eduardo Torroja Miret

Sistemas estructurales de vector activo

Sistemas estructurales

Se define sistema estructural al conjunto de elementos vinculados entre sí, que juntos son capaces de resistir y transmitir las cargas que actúan sobre una construcción, pudiendo deformarse dentro de límites tolerables. El comportamiento final de los sistemas estructurales depende fundamentalmente de cómo se vinculan entre sí los elementos componentes y como se vincula todo el sistema con el suelo. Según Heino Engel estos pueden clasificarse en:

1- Sistemas estructurales de forma activa: trabajan con compresión dominante o tracción pura. En el caso de la compresión las formas más comunes utilizadas son los arcos, bóvedas y cúpulas. Entre los sistemas de tracción pura podemos mencionar las estructuras de cables.

2- Sistemas estructurales de vector activo: los elementos que componen el sistema trabajan a tracción y compresión ya que se descomponen vectorialmente las cargas. Estos sistemas se caracterizan por poseer configuraciones de triángulos.

3- Sistemas estructurales de sección activa: los elementos estructurales que forman el sistema trabajan a flexión, como las losas, vigas, emparrillados de vigas, pórticos, etc.

4- Sistemas estructurales de superficie activa: estos elementos resisten las cargas por continuidad superficial materializándose generalmente por láminas de poco espesor. Algunos ejemplos de este tipo de sistema lo constituyen las cáscaras y las estructuras plegadas.

5- Sistemas estructurales de altura activa: son sistemas encargados de resistir las cargas en construcciones de altura (edificios), tanto las verticales como las horizontales.

Teniendo en cuenta las características geométricas de los tubos de cartón y sus propiedades mecánicas, es conveniente trabajar con sistemas estructurales que trabajen fundamentalmente a compresión y tracción. Es por ello que a continuación me explicaré sobre los sistemas estructurales de vector activo.

“Los tipos estructurales de mayor eficiencia son aquellos en que se elimina la flexión y el trabajo interno es fundamental, o exclusivamente, de tracción o de compresión.

Daniel Moisset de Espanés

Estructuras de vector activo

Las estructuras de vector activo son aquellas formadas por barras vinculadas entre sí por medio de nudos articulados, conformando triángulos (figura indeformable).

La utilización de este tipo de estructuras se remonta al medioevo donde se realizaban entramados de madera para sostener las cubiertas de las iglesias, pero es recién en el siglo XIX cuando alcanzan un gran desarrollo.

La particularidad de estas estructuras es que cada elemento trabaja a esfuerzos axiales, es decir, a compresión o tracción, haciendo que toda su sección tenga una distribución uniforme de tensiones hasta alcanzar el máximo de su capacidad resistente. Esto implica que hay un gran aprovechamiento del material. Para ello, las barras deben ser rectas, conservar el ensamble triangular, los ejes de las barras que concurren a un nudo coincidir y cortarse en un punto y las cargas actuar aplicadas en los nudos.

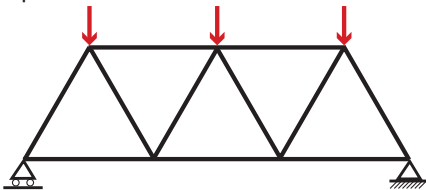


Figura 12: Viga reticulada con carga en los nudos
Fuente: elaboración propia

La posición de las barras en relación con la dirección de las solicitaciones determina la magnitud de las fuerzas vectoriales en las barras, es

por ello que se recomienda trabajar con ángulos entre 45° y 60° (Engel, 2006, p.133).

Se puede aumentar la altura de las vigas para cubrir mayores luces con gran economía de material, y sin aumentar demasiado el peso propio. Generalmente son materializadas con barras de madera o acero. Las secciones más recomendadas o utilizadas son las circulares huecas porque aprovechan al máximo la capacidad resistente del material, ya que se garantiza una óptima relación entre el área y la inercia de la pieza. Pero, en oposición, se deben controlar las piezas sometidas a compresión por su vulnerabilidad a sufrir fallas por pandeo garantizando mayores secciones o arriostamientos que lo eviten.

Pueden clasificarse en dos grandes grupos, sistemas bidimensionales o reticulados planos y tridimensionales o reticulados espaciales. En el caso de los planos, conformados a partir de la figura del triángulo y los espaciales a partir de tetraedros y pirámides de base cuadrada, ya que estas configuraciones son las que permiten la descomposición vectorial de las cargas en cada nudo.

Si bien, al analizar cada barra estas trabajarán a compresión o tracción, el conjunto se comporta como un sistema resistiendo esfuerzos de flexión y corte, es decir, este tipo de configuración nos permite descomponer la flexión y el corte en compresiones y tracciones en cada uno de los elementos componentes.

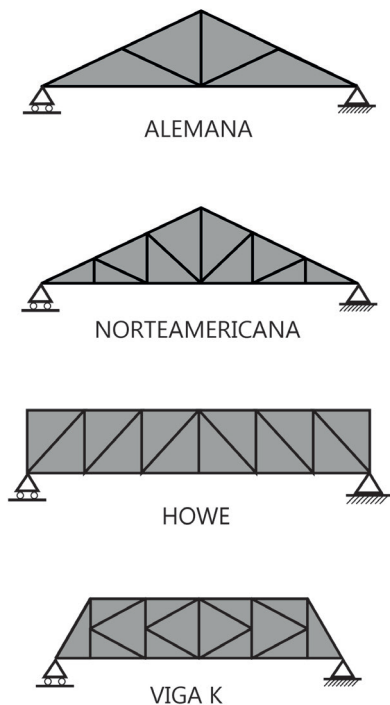
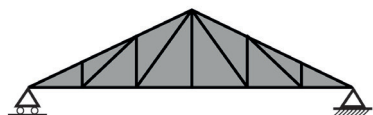


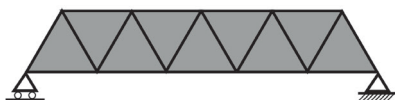
Figura 13: Diferentes tipos de reticulados planos
Fuente: elaboración propia

Dentro de los reticulados planos (Figuras 13 y 14) podemos mencionar los reticulados de cordones paralelos, las cerchas, sistemas planos asimilables a formas aporricadas, sistemas planos asimilables a arcos y sistemas planos triangulados como estructuras verticales para edificios en altura (Diez, 2007, p.143).

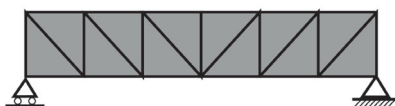
Dentro de los reticulados espaciales se destacan los sistemas curvos triangulados que permiten configuraciones como cúpulas o bóvedas y las estereoeestructuras (Diez, 2007, p.200).



INGLESA



WARREN



PRATT



POLONCEAU

Figura 14: Diferentes tipos de reticulados planos
Fuente: elaboración propia

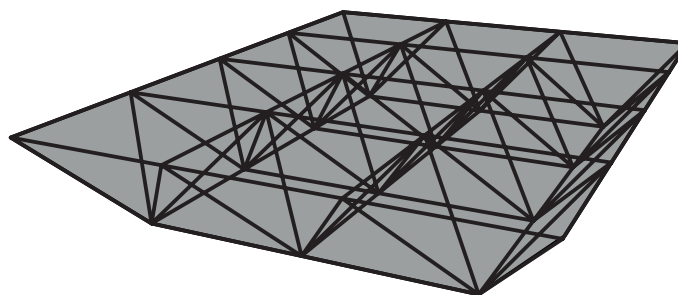


Figura 15: Estereoeestructura
Fuente: elaboración propia

Uniones de estructuras trianguladas:

El diseño de uniones es uno de los puntos más críticos de estos sistemas estructurales, ya que en general requieren elementos adicionales para su materialización.

Los vínculos en las estructuras trianguladas deben ser articulaciones, permitiendo al sistema mantenerse estable para cargas horizontales como para cargas verticales.

A su vez es de suma importancia que este tipo de uniones contemplen y faciliten el proceso constructivo del objeto que vaya a realizarse.

Los materiales típicos utilizados en las articulaciones son: acero, madera, aluminio y en la actualidad se está experimentando con plástico. Estas uniones no necesariamente son del mismo material que las barras que unen.

En las Tablas 7 y 8 se expondrán los diferentes nudos relevados compatibles con elementos tubulares de cartón, agrupándolos según permitan la configuración de estructuras planas o espaciales:

	Tipo de unión	Material	Material del elemento que une	Cant. de barras que concurren al nudo	Uso de materiales reciclados
	Espacial	Plástico/ impresión 3D	Plástico	4	Al ser impresa en 3D puede utilizarse filamento reciclado
	Espacial	Plástico/ impresión 3D	Plástico	4	Al ser impresa en 3D puede utilizarse filamento reciclado
	Espacial	Plástico/ impresión 3D	Plástico	6	Al ser impresa en 3D puede utilizarse filamento reciclado
	Espacial/ plana	Plástico	Plástico	5	Recicla botellas de PET
	Espacial/ plana	Plástico	Madera	Variable	No
	Espacial	Plástico/ impresión 3D	Tubos de cartón	4	Al ser impresa en 3D puede utilizarse filamento reciclado
	Espacial	Plástico	Madera	6	No

Tabla 7: Uniones articuladas
Fuente: Elaboración propia

Tipo de unión	Material	Material del elemento que une	Cant. de barras que concurren al nudo	Uso de materiales reciclados	
Espacial	Aluminio	Bambú	6	No	
Plana	Madera	Tubos de cartón	3	Puede utilizar maderas de des-carte para su construcción.	
Plana	Madera	Tubos de cartón	3	Puede utilizar maderas de des-carte para su construcción.	
Espacial	Acero y madera	Tubos de cartón	6	No	
Espacial/ plana	Plástico	Bambú	Variable	No	
Plana	Madera	Tubos de cartón	4	No	
Espacial	Acero y madera	Tubos de cartón	4	No	

Tabla 8: Uniones articuladas
Fuente: Elaboración propia

Es importante destacar que todas las uniones relevadas en las que se vinculan tubos de cartón fueron diseñadas por Shigeru Ban. Para evitar aplastamientos en el material, en la mayoría de los casos, maciza los extremos incorporando tacos de madera dentro del tubo.

Tanto las uniones resueltas en madera como las de acero, tienen un peso considerable con respecto a los elementos que unen, por lo tanto, habrá que evaluar el medio de unión más eficiente según la construcción que se vaya a diseñar en función de las luces que tenga que salvar y las cargas que haya que resistir.

Ventajas y desventajas:

Entre las ventajas de estos sistemas estructurales podemos citar:

- 1) Resisten grandes cargas de servicio en relación a su peso propio.
- 2) Utilizan piezas de secciones pequeñas para la conformación de sistemas que cubren luces significativamente mayores.
- 3) Todos los elementos trabajan a tracción o compresión, evitándose la flexión y el corte.

Como desventaja se puede mencionar:

- 1) Es necesario que las cargas se apliquen en los nudos para garantizar su descomposición vectorial. En caso contrario, las piezas componentes además de tracción y compresión tendrían que resistir esfuerzos de flexión y corte.
- 2) Se deben garantizar que las uniones sean articulaciones. Por lo mismo que se mencionó anteriormente.

Conclusiones:

El sistema estructural de vector activo es el más conveniente para proyectar construcciones temporales con tubos de cartón dadas sus características geométricas.

Se considera conveniente un estudio profundo y minucioso de las uniones para garantizar que sean articuladas, que no produzcan fallas locales en los tubos y que permitan múltiples configuraciones formales.

Estas uniones además deben ser económicas por tratarse de construcciones con una corta vida útil. Las uniones metálicas se descartan por considerarse muy costosas, por lo que me enfocaré en el diseño de uniones con plástico, impresas en 3D, en lo posible, reutilizando materiales desechados como por ejemplo el PET.



CAPÍTULO

04

**Arquitectura temporal:
casos de estudio**

Arquitectura temporal: casos de estudio

Arquitectura temporal:

La arquitectura temporal o efímera enmarca a proyectos pasajeros, realizados para que permanezcan en pie durante un corto plazo. Este tipo de arquitectura ha permitido a lo largo de los años la experimentación de las nuevas tecnologías, que luego han sido incorporadas a la construcción tradicional.

Uno de los ejemplos más claros de esto son los Serpentine Gallery Pavilions (Figura 16 y 17), donde diferentes arquitectos han podido experimentar con maquetas a escala real, nuevos materiales y técnicas constructivas. Una arquitectura, para ser considerada temporal, debe ser flexible, es decir, fácilmente adaptable según la demanda de su uso y al medio donde estará ubicada pero también ligera, con un montaje y desmontaje que se pueda realizar con facilidad y que permita el traslado. Otra característica importante es que generalmente incorpora materiales y recursos de su entorno inmediato (Figura 18).



Figura 16: Serpentine Gallery Pavilion- BIG

Fuente: <https://serpentine-uploads.s3.amazonaws.com/uploads/2020/04/big-pavilion-image-c-iwan-baan-5small.jpg>



Figura 17: Serpentine Gallery Pavilion- Jean Nouvel

Fuente: <https://www.theguardian.com/artanddesign/2010/mar/23/serpentine-gallery-jean-nouvel>



Figura 18: ICD | ITKE Research Pavilion 2011 / ICD/ITKE University of Stuttgart

Fuente: <https://images.adsttc.com/media/images/5004/e8b9/28ba/0d4e/8d00/0dd6/slideshow/stringio.jpg?1414530847>

Casos de estudio:

Uno de los referentes de la arquitectura con tubos de cartón es el arquitecto Shigeru Ban. Entre sus obras podemos citar proyectos temporales y permanentes. En el siguiente capítulo se abordará el estudio de 4 obras temporales en las que utilizó este material y a las que organizó con sistemas estructurales diferentes. Esto permitirá luego evaluar las demandas espaciales, técnicas y seccionales de cada caso para poder extraer conclusiones que permitan ver su factibilidad en proyectos locales.

1- Paper log: Viviendas en Kobe (1995) Kobe, Japón



Figura 19: Viviendas de emergencia en Kobe
Fuente: <http://www.tada-ima.com/blog/2016/12/14/paper-log-house>

Se trata de viviendas temporales de 16 m² de superficie, para dar refugio a familias que se encontraban viviendo en carpas luego de que un terremoto de 6.9 de magnitud de la escala de Richter, destruyera sus hogares.

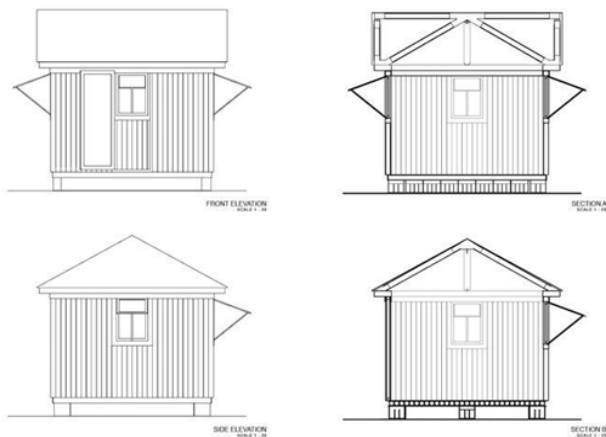


Figura 20: Vistas y cortes de viviendas de emergencia en Kobe
Fuente: <http://www.tada-ima.com/blog/2016/12/14/paper-log-house>

El esquema es equivalente a una estructura de muros portantes, conformados por tubos de cartón de 108 mm de diámetro y 4 mm de espesor, asentadas sobre cajones de cerveza llenos de arena, logrando así aislarlos del terreno. El cerramiento superior de la vivienda se propuso con lona de las carpas, por ser impermeable, para evitar el ingreso de agua y con la posibilidad de abrirse o cerrarse según las diferentes épocas del año, ayudando a mejorar el confort climático de las mismas.



Figura 21: Foto interior de viviendas de emergencia en Kobe
Fuente: <http://www.tada-ima.com/blog/2016/12/14/paper-log-house>

Planteo Estructural:

La cubierta del techo apoya sobre vigas reticuladas espaciales, materializadas con tubos de cartón que se encuentran vinculados entre sí por conectores de madera. Estas vigas, apoyan sobre un marco de madera ubicado sobre la cortina de tubos de cartón que forman las paredes. De esta forma, la rigidez de la madera permite una distribución uniforme de las cargas de la cubierta entre todos los tubos de la pared sin concentrar grandes esfuerzos localmente.

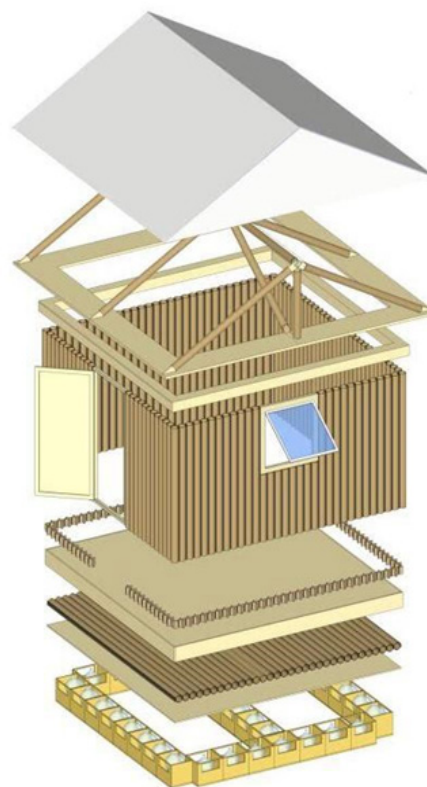


Figura 22: Despiece de viviendas de emergencia en Kobe
Fuente: <https://www.behance.net/gallery/47456181/Study-of-the-Paper-Log-House-by-Shigeru-Ban-2015>



La estructura así planteada es indiferenciada. La sucesión de tubos de cartón de las paredes se encuentra unida entre sí por medio de cinta de esponja impermeable doble faz. Los tubos se fijan a una base formada por cruces de madera mediante tornillos. Estas cruces apoyan luego sobre una plataforma conformada por un sándwich de contrachapado y tubos de cartón. La plataforma así diseñada se coloca sobre unos cajones de cervezas llenos de arena que hacen de bases y que son los encargados de transmitir sus cargas al terreno



Figura 23: Foto interior de viviendas de emergencia en Kobe
Fuente: <https://www.wallpaper.com/architecture/shigeru-ban-exhibition-sydney-sherman-contemporary-art-foundation#192909>

Figura 24 (superior): Foto de detalle de unión
Fuente: <https://www.behance.net/gallery/47456181/Study-of-the-Paper-Log-House-by-Shigeru-Ban-2015>

Para lograr estabilidad frente a las presiones producidas por el viento se plantearon triangulaciones en las fachadas por medio de la utilización de cables.



Figura 25: Foto exterior donde se observan las triangulaciones
Fuente: <https://www.designboom.com/architecture/shigeru-ban-vancouver-art-gallery-kobe-paper-log-house-06-22-2018/>

2- Estudio temporal de papel en el Pompidou (2004) Paris, Francia

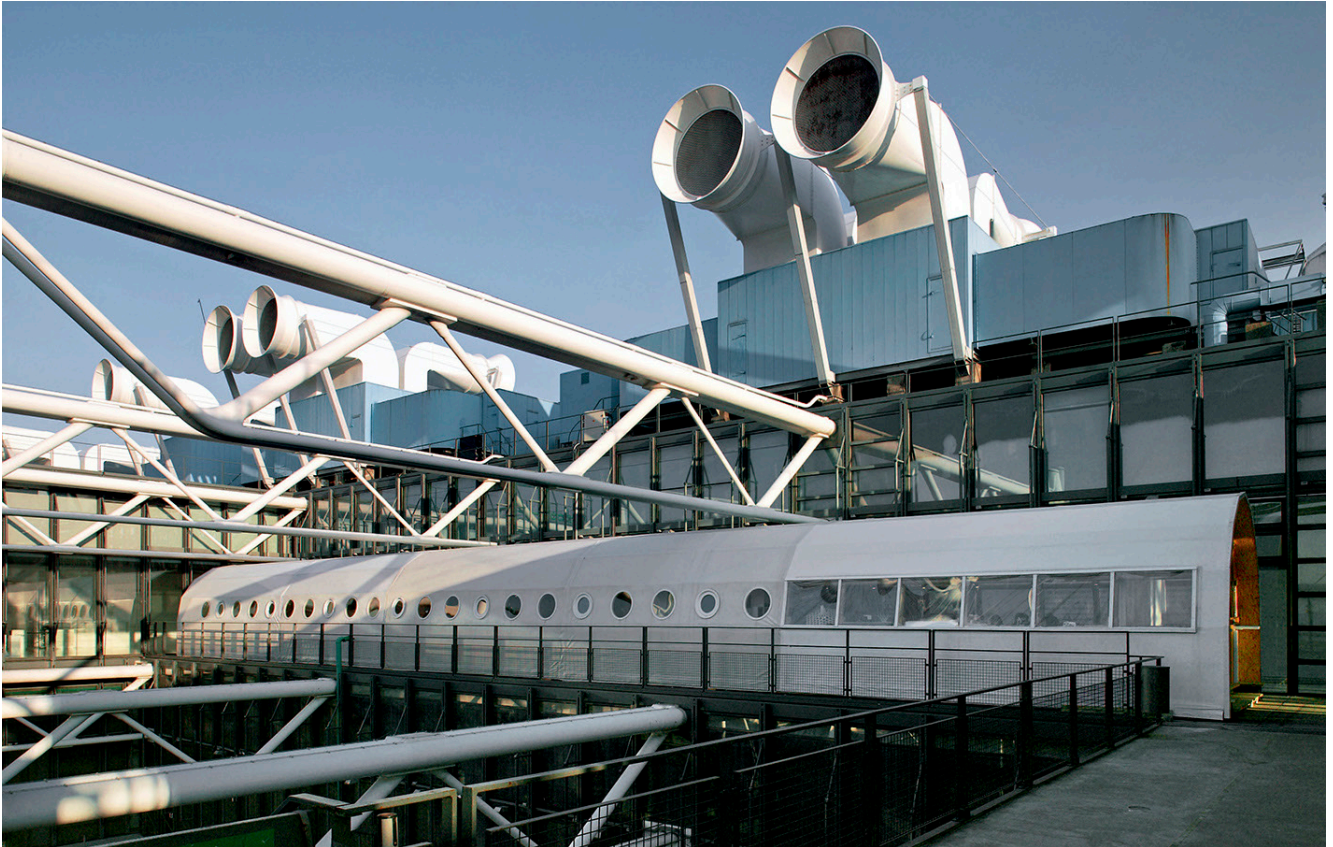


Figura 26: Foto exterior del Estudio temporal en el Pompidou
Fuente: <https://arquitecturaviva.com/obras/estudio-temporal-de-papel>

Este proyecto surge luego de que Ban fuera seleccionado para diseñar el Pompidou Metz. El arquitecto necesitaba un estudio en el cual trabajar, por lo que le sugirió al presidente del centro Pompidou instalarlo en la terraza del edificio de Piano y Rogers para ahorrar el alquiler de un espacio y de esta manera poder realizar el proyecto con los honorarios convenidos (Jodidio 2015).

Fue construido durante el verano en un taller en el que participaron alumnos del laboratorio de investigación

de la Universidad de Kioto en Japón, junto con estudiantes de arquitectura de París.

Consiste en un espacio tubular de 34.5 metros de largo y 4.4 metros de ancho. En toda su longitud se encuentra cubierto por una membrana impermeable y paneles de OSB con perforaciones circulares que permiten el ingreso de luz cenital en la parte más alta de la bóveda y en la parte más baja configuran ventanas.

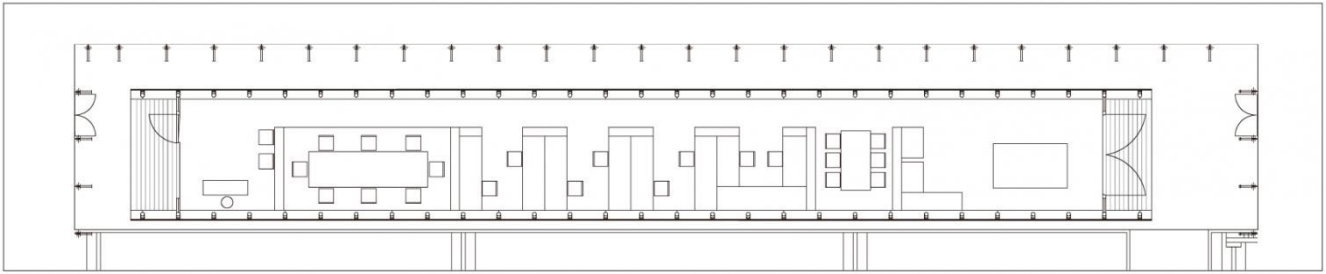
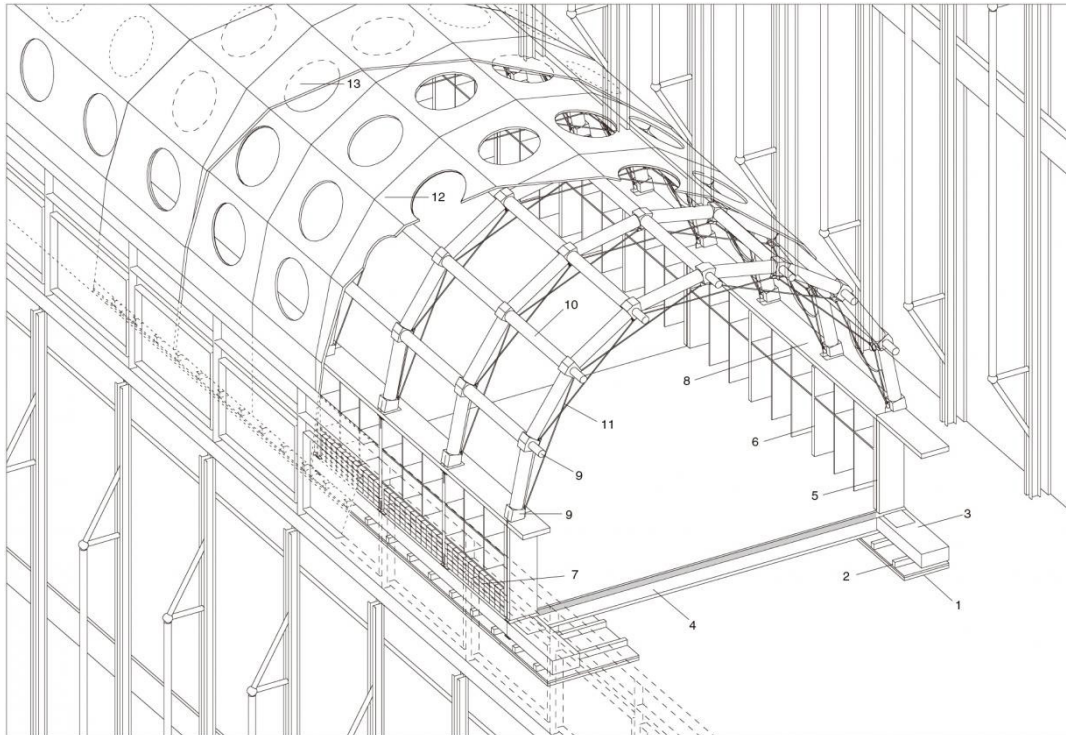


Figura 26: Planta y foto interior del Estudio temporal en el Pompidou
Fuente: <https://arquitecturaviva.com/obras/estudio-temporal-de-papel>



- 1 aislamiento (e=30),
contrachapado (e=20)
 - 2 traviesa: madera (60x50)
 - 3 base de madera
 - 4 viga de atado (91x180)
 - 5 travesaño de acero;
refuerzo de madera
 - 6 poste de madera (e=50)
 - 7 contrapeso: bloques de
cemento (160 kg/m)
 - 8 tablero superior (e=50)
 - 9 articulación de madera
 - 10 retícula tubos de papel
con resina de poliuretano
 - 11 tirante: barra acero
 - 12 revestimiento: OSB
 - 13 membrana: PVC, PTFE
-
- 1 insulation (t=30 mm),
plywood (t=20 mm)
 - 2 sleeper: timber (60x50)
 - 3 timber foundation
 - 4 tie beam (91x180)
 - 5 steel stud (t=12);
reinforce: timber (t=50)
 - 6 timber post (t=50)
 - 7 ballast: concrete block
(160 kg/m)
 - 8 top board (t=50)
 - 9 joint: timber
 - 10 paper tube, polyurethane
resin coated
 - 11 brace: steel rod
 - 12 sheathing: OSB (t=18)
 - 13 membrane: PVC, PTFE

Figura 27: Axonometría del Estudio temporal en el Pompidou
Fuente: <https://arquitecturaviva.com/obras/estudio-temporal-de-papel>

Planteo Estructural:

La estructura está formada por 29 arcos hechos por tubos de cartón separados cada 1.2 metros. Estos se unen entre sí por tubos longitudinales, conformando finalmente una retícula. Los tubos de cartón de los arcos tienen 120 mm de diámetro interior. El arco es facetado según el largo de los tubos y las vinculaciones entre ellos fueron realizadas con bloques de madera que permiten el encaste y posterior atornillado. En

los nudos de madera se colocaron además planchuelas que permitieron el atado de cables de acero para formar los arriostramientos contraviento.

Para los apoyos se realizaron postes de madera asentados sobre un riel del mismo material. Entre los postes de madera se colocaron contrapesos con bloques de cemento unidos por una viga para garantizar contrarrestar los empujes del arco.



Figura 28: Fotos exteriores del Estudio temporal en el Pompidou
Fuente: <https://www.designboom.com/architecture/shigeru-ban-paper-temporary-studio-louis-vuitton-04-26-2019/>



Figura 29: Foto exterior del Estudio temporal en el Pompidou
Fuente: <https://arquitecturaviva.com/obras/estudio-temporal-de-papel>

3- Escuela primaria temporal en Hualin (2008) Chengdu, China



Figura 29: Foto interior de la Escuela temporal en Hualin

Fuente: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-346388/la-obra-social-y-caritativa-del-premio-pritzker-2014-shigeru-ban/532b137cc07a803b4200002c-the-humanitarian-works-of-shigeru-ban-photo>

Luego de que en mayo de 2008 el terremoto de Sichuan destruyera la antigua escuela de esa ciudad, más de 800 estudiantes tuvieron que ser relocalizados en otros establecimientos. Este proyecto surge bajo la premisa de que tanto el diseño como la construcción de la obra se lleve a cabo en dos meses. Con esto se buscaba, tener una escuela provisoria, construida a gran velocidad, para que los estudiantes pudieran tener clases sin trasladarse mientras se construía una nueva.

Fue realizado conjuntamente por estudiantes de arquitectura de la universidad de Keio de Japón y de la Universidad de Soothwest Jiaotong de China y su ejecución llevó cuarenta días.

El proyecto se desarrolla en tres tiras de 30 metros de largo por 6 metros de ancho, donde se alojaban 9 aulas, rodeadas por una galería perimetral.



Figura 30: Foto aérea de la Escuela temporal en Hualin
 Fuente: <https://arquitecturaviva.com/obras/escuela-temporal-hualin#lg=1&slide=2>

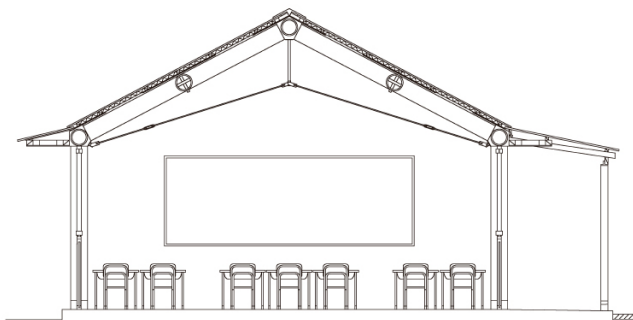


Figura 31: Corte de la Escuela temporal en Hualin
 Fuente: <https://arquitecturaviva.com/obras/escuela-temporal-hualin#lg=1&slide=2>

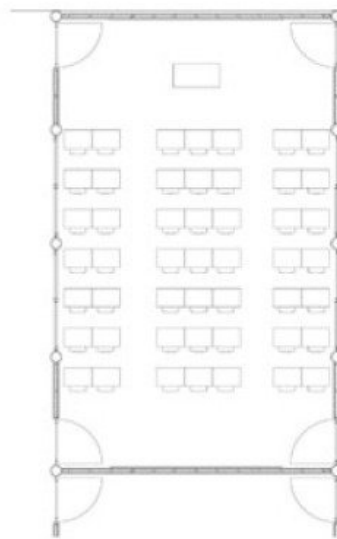


Figura 32: Planta de la Escuela temporal en Hualin
 Fuente: <https://arquitecturaviva.com/obras/escuela-temporal-hualin#lg=1&slide=2>

Planteo Estructural:

Debido a la necesidad de construir la escuela rápidamente se pensó en un sistema con pocos componentes y con métodos de construcción de fácil interpretación para los voluntarios.

La estructura se montó sobre los cimientos de la antigua escuela. La misma está configurada por vigas y columnas de tubos de cartón dispuestas cada 2.5 metros. Las uniones entre las vigas y las columnas están dadas por tacos de madera que permiten el encaسته de los tubos.



Figura 33: Montaje de la Escuela temporal en Hualin

Fuente: <https://arquitecturaviva.com/obras/escuela-temporal-hualin#lg=1&slide=2>

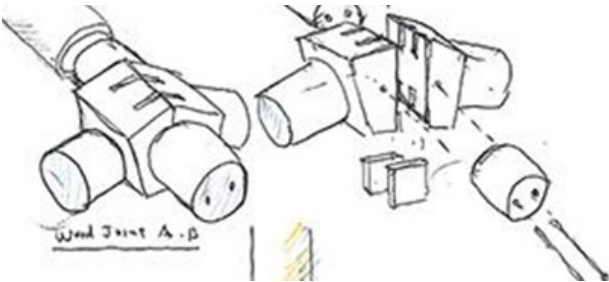


Figura 34: Axonometría del nudo de la Escuela temporal en Hualin

Fuente: <https://arquitecturaviva.com/obras/escuela-temporal-hualin#lg=1&slide=2>

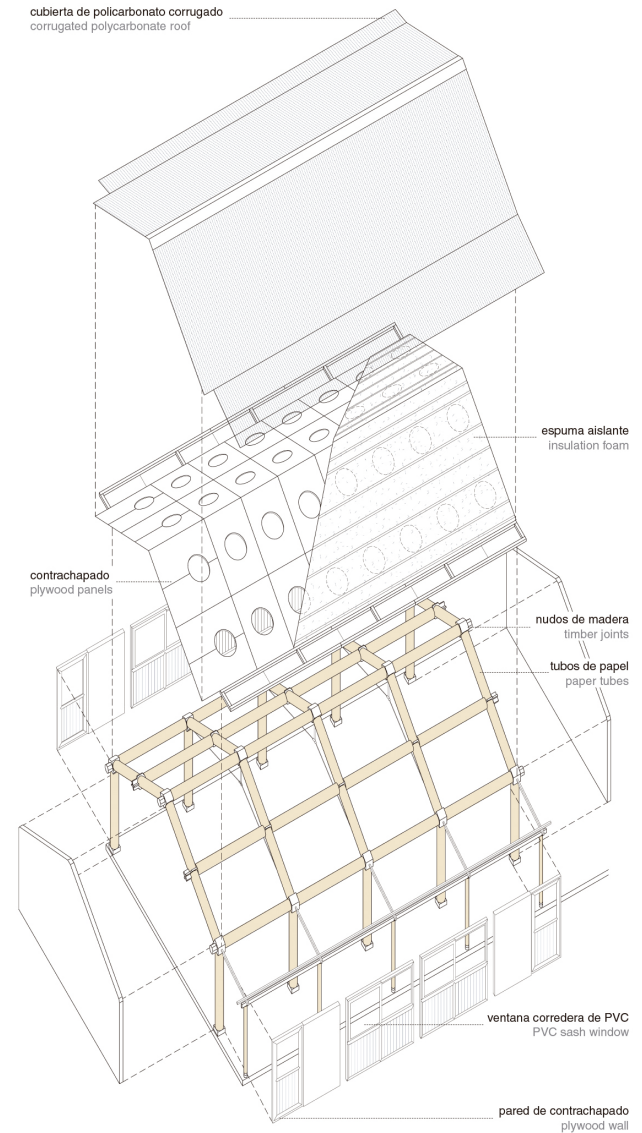


Figura 35: Axonometría de la Escuela temporal en Hualin

Fuente: <https://arquitecturaviva.com/obras/escuela-temporal-hualin#lg=1&slide=2>

La estructura del techo está compuesta por tubos de cartón y tensores de acero configurando cerchas que salvan la luz de 6 metros.

Sobre las cerchas se colocó paneles de contrachapado de madera con huecos circulares que permiten el ingreso de luz cenital a través del policarbonato translucido blanco de la cubierta.

La estabilidad frente a las fuerzas horizontales se logró mediante la rigidización de la cubierta y algunos vanos de los planos laterales con estos paneles de contrachapado.

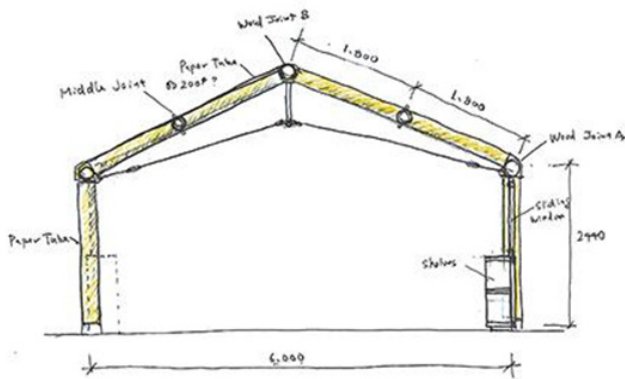


Figura 36: Corte de la Escuela temporal en Hualin

Fuente: <https://arquitecturaviva.com/obras/escuela-temporal-hualin#lg=1&slide=2>

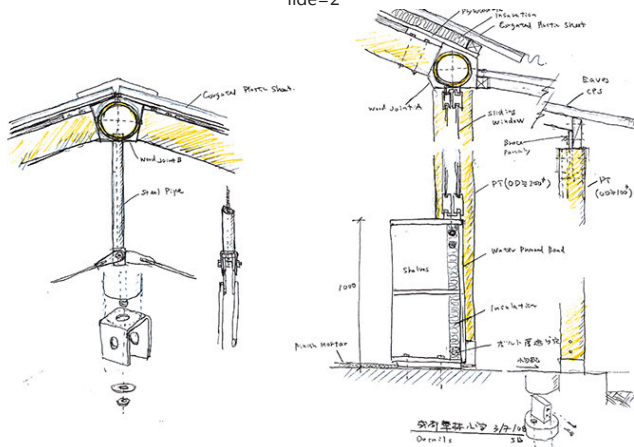


Figura 37: Detalle de la Escuela temporal en Hualin

Fuente: <https://arquitecturaviva.com/obras/escuela-temporal-hualin#lg=1&slide=2>



Figura 38: Etapa de construcción de la Escuela temporal en Hualin

Fuente: <https://arquitecturaviva.com/obras/escuela-temporal-hualin#lg=1&slide=2>

4- IE Paper Pavilion (2013), Madrid, España



Figura 39: Foto exterior del pabellon IE en Madrid

Fuente: <https://diariodesign.com/2013/07/shigeru-ban-designs-pavilion-paper-tubes-ie-university-campus-madrid/>

Este pabellón temporal fue realizado en el campus de la IE Business School de Madrid en el año 2003 para generar un lugar que permita reuniones para el intercambio de ideas, albergar eventos de Executive Educations y otras actividades.

Se trata de un espacio transparente de 102 m² cubiertos,

abierto lateralmente, rodeado por una pequeña galería. Al igual que otras obras de este arquitecto, aquí también participaron estudiantes durante el ensamble, trabajando en conjunto con la empresa constructora.

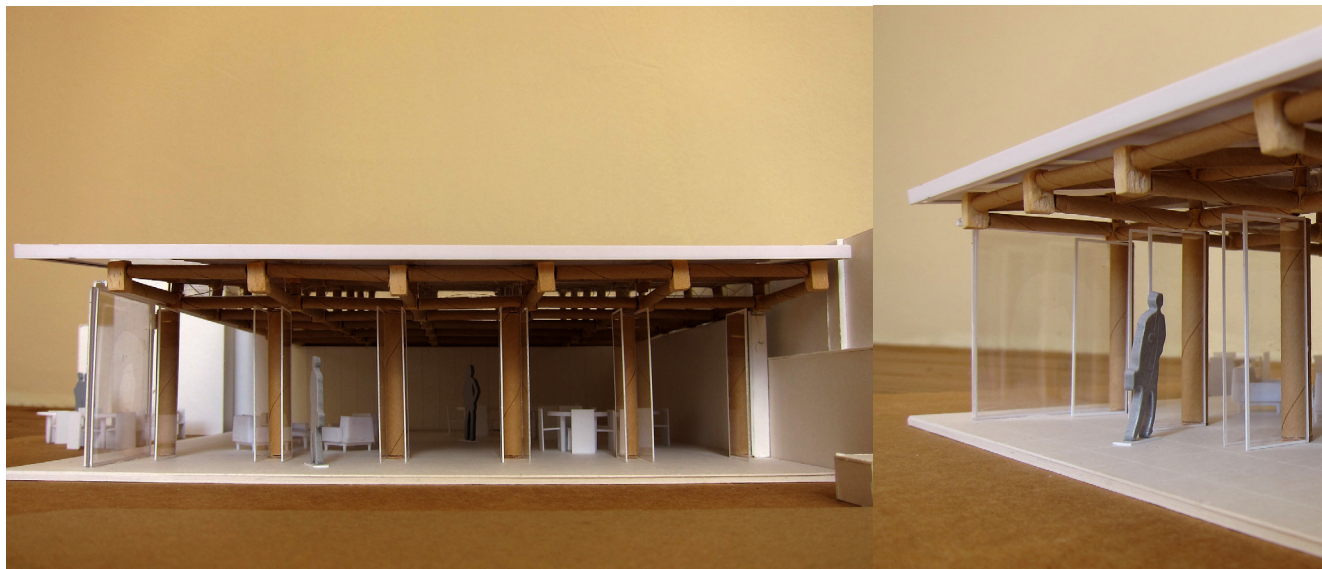


Figura 40: Imagen de la maqueta del pabellon IE en Madrid
Fuente: <https://www.flickr.com/photos/ie-business-school/8634084303/in/photostream/>

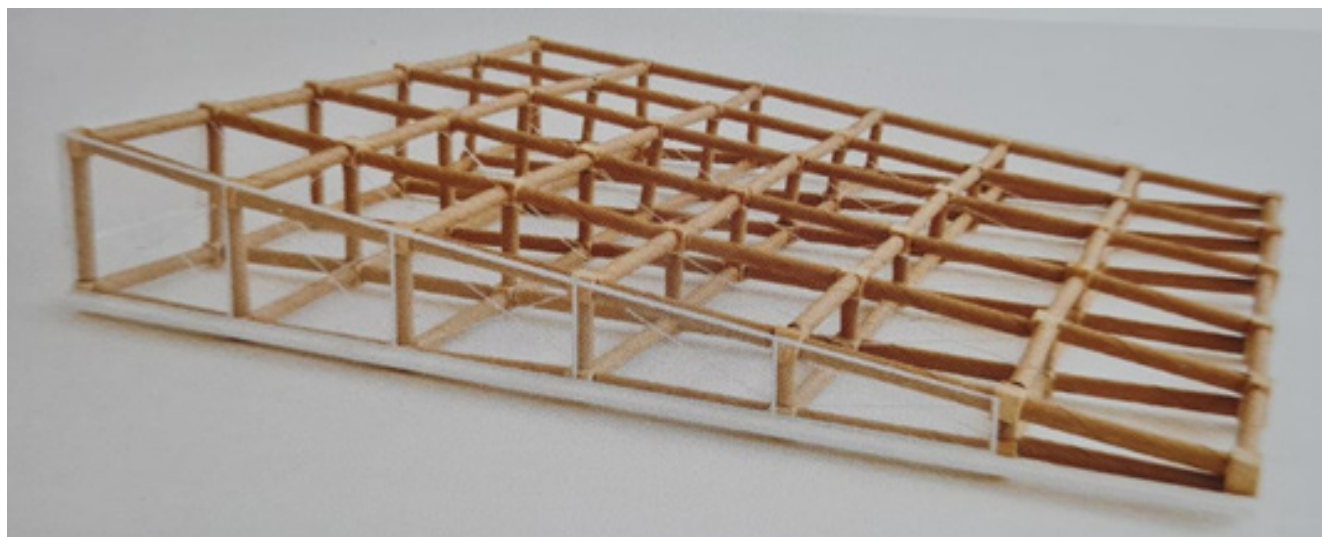


Figura 41: Imagen de la maqueta del pabellon IE en Madrid
Fuente: <https://www.flickr.com/photos/ie-business-school/8634084303/in/photostream/>



Figura 42: Unión de tubos del IE Pabellón

Fuente: <https://diariodesign.com/2013/07/shigeru-ban-designs-pavilion-paper-tubes-ie-university-campus-madrid/>

Planteo estructural:

La estructura del pabellón se encuentra resuelta con 173 tubos de cartón, fabricados con papel reciclado en una planta de Zaragoza cercana a las instalaciones.

La misma esta configurada por reticulados planos de tubos de cartón, separados cada 2 m, sobre los cuales apoya una cubierta tipo sándwich. Las diagonales de estos reticulados se encuentran materializadas en acero. Las uniones entre las barras se resuelven con tacos de madera que encastran dentro de los tubos para ser luego atornillados.

Los reticulados apoyan en uno de sus lados sobre un muro preexistente y en el otro en columnas de tubo de cartón de 40 cm de diámetro separados del suelo por un apoyo de madera que encastra dentro del tubo.

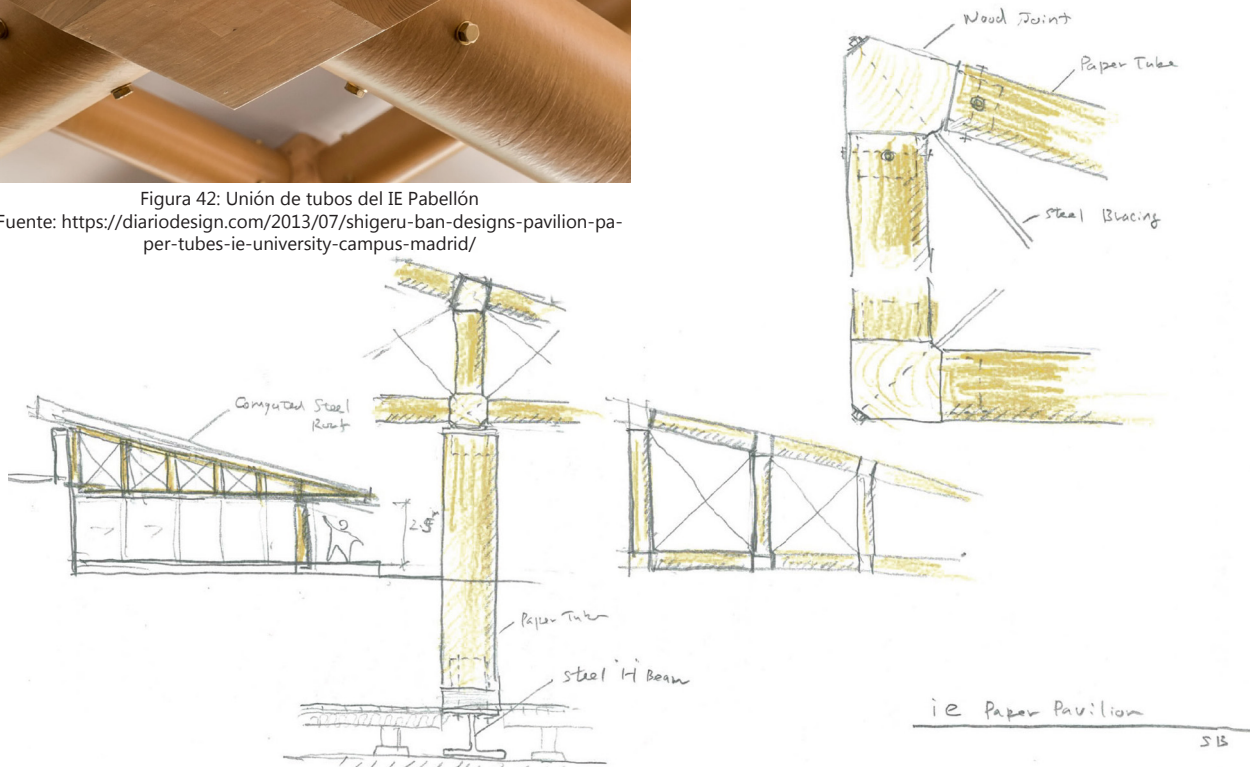


Figura 43: Gráficos realizados por Shigeru Ban del IE Pabellón

Fuente: <https://dnewblog.files.wordpress.com/2013/03/ie-paper-pavilion.jpg>



Figura 44: Foto del IE Pabellón
Fuente: <https://www.designboom.com/architecture/shigeru-ban-ie-cardboard-paper-pavilion/>

Conclusiones:

Luego del estudio de algunas obras del Arq. Shigeru Ban puede observarse que la construcción de arquitectura temporal con tubos de cartón es posible en diferentes sitios y con diferentes escalas.

Si analizamos la evolución de su arquitectura desde las viviendas en Kobe al pabellón de papel en Madrid, podemos observar cómo Shigeru va modificando la forma de utilizar el material, partiendo de una estructura densa, donde piel y estructura son una sola cosa, a una estructura más ligera cubriendo luces cada vez mayores y logrando propuestas más livianas, permeables y adaptables.

Por lo tanto, se puede concluir que el uso de tubos de cartón no es limitante para generar configuraciones de sistemas estructurales diversos, según las luces que se deben salvar y el destino del proyecto.

CAPÍTULO

05

**Diseño de prototipo
estructural modular**

“La estabilidad de una construcción no depende de la resistencia mecánica de su material”

Shigeru Ban

En este capítulo y en base a todo lo investigado previamente, ensayaré el diseño de un prototipo modular con tubos de cartón para dar soporte a una arquitectura temporal. El mismo será modelado con un programa de cálculo y teniendo en cuenta los reglamentos vigentes, se verificarán las secciones de sus tubos componentes considerando las combinaciones de cargas con viento. También se diseñarán y construirán propuestas para las uniones.

Prototipo estructural modular con tubos de cartón adaptables y flexibles:

Del relevamiento de antecedentes de construcciones que utilizan tubos de cartón como estructura, pudo observarse gran variedad de escala como así también de destino de uso de las mismas.

Los tubos de cartón demuestran ser grandes posibilidades a la hora de construir, es por esto que se propone diseñar una tipología estructural que permita verificar la factibilidad de su uso en Córdoba.

En este diseño, teniendo en cuenta lo analizado en capítulos anteriores se destaca que un punto importante y clave es la unión entre barras. El interrogante que surge es ¿Cómo unir las piezas de manera que permita generar un nudo articulado con la versatilidad suficiente para ser adaptado a múltiples configuraciones? En el capítulo 3 se estudiaron diferentes tipos de nudos y materialidades, incluyendo el uso de materiales reciclados para su realización. Es así que para el desarrollo de este prototipo se pondrá por encima la sostenibilidad ambiental del proyecto, por lo que se decide utilizar para los vínculos botellas PET y realizar uniones impresas en 3D con filamentos reciclados.

Programa

Se propone diseñar un espacio temporal destinado a albergar un sector de exposición temporal.

Diseño

Con respecto al diseño morfológico del proyecto se parte de la idea de trabajar con triángulos, para así poder configurar sistemas eficientes de vector activo. Es por esto que se diseña una cercha tipo Warren para de esta manera trabajar con barras de la misma longitud.

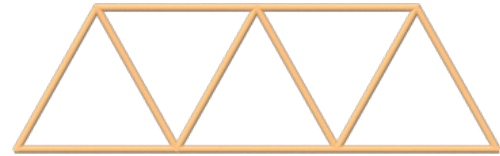


Figura 45: Viga tipo Warren
Fuente: Elaboración propia

Con la repetición de este elemento se diseña a continuación un arco triarticulado conformado por 4 de estas vigas vinculadas por una barra conectora de mayor longitud (Figura 46).

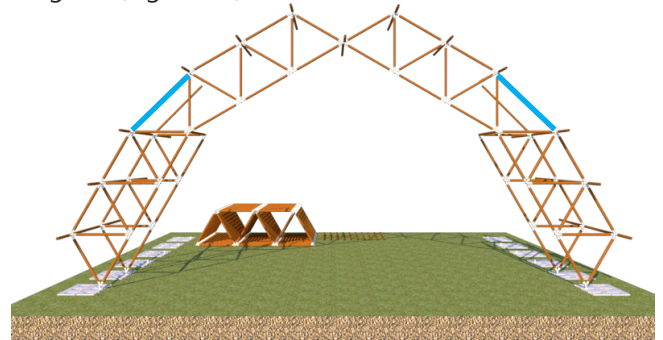


Figura 46: Arco triarticulado
Fuente: Elaboración propia

La repetición de este arco cada 1.20 m permitirá configurar un espacio en el que se puedan desarrollar actividades de carácter temporal como ser: ferias, exposiciones, etc.

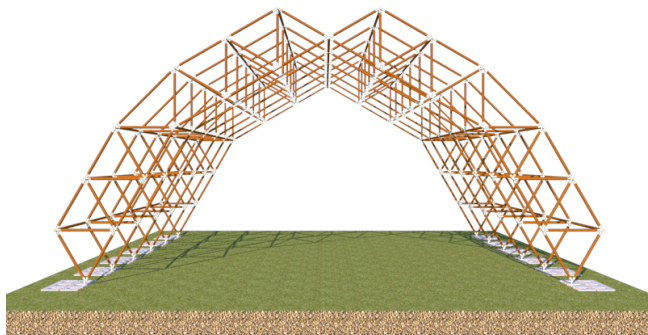


Figura 47: Repetición de arcos triarticulados
Fuente: Elaboración propia

La cubierta será resuelta con policarbonato alveolar translúcido de 10 mm de espesor.

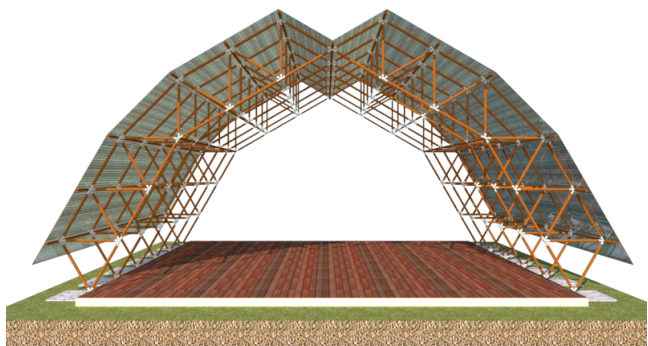


Figura 48: Repetición de arcos triarticulados con cubierta de policarbonato
Fuente: Elaboración propia

El apoyo al suelo se resolverá generando pequeñas excavaciones en la zona donde apoya cada arco en las cuales se colocan bidones rellenos con arena (atados entre ellos) y se atornilla una base impresa a la tapa de uno de los bidones.

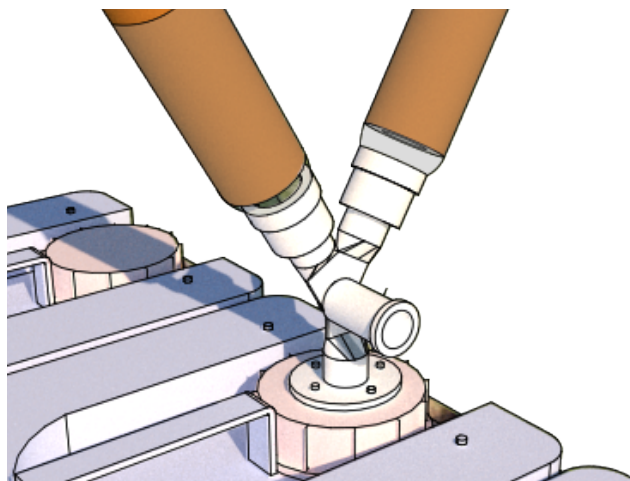


Figura 49: Unión del arco con los bidones
Fuente: Elaboración propia

Proceso para la realización del prototipo:

• Protección de las barras:

Para proteger las barras de la acción del agua se propone cubrir toda la superficie con botellas descartables de PET y con pistola de calor lograr la adherencia al tubo.

Es importante tener en cuenta que el tamaño de la botella no debe ser mucho mayor que el diámetro del tubo con el que se vaya a trabajar, ya que puede suceder que el plástico comience a abollarse y pierda adherencia.



Figura 50: Tubo de cartón cubierto con PET de botellas descartables
Fuente: Elaboración propia

La utilización de botellas de PET permitió a su vez cerrar las puntas del tubo dejando en sus extremos el pico de la botella.



Figura 51: Extremo de tubo de carton con pico de botella PET

Fuente: Elaboración propia

• Diseño de uniones:

La presencia del pico de la botella en el extremo del tubo, permitió pensar en una unión que tome algunas ideas de las relevadas en el capítulo 3 impresas en 3D, diseñada para estructuras espaciales. En este caso, adaptándolas para configuraciones en el plano.

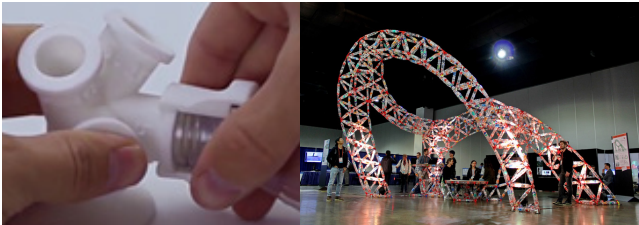


Figura 52: Union impresa en 3D y prototipo construido con botellas de Coca Cola

Fuente: TrussFab: Fabricating Sturdy Large-Scale Structures on Desktop 3D Printers

Para ello se plantearon 3 uniones diferentes con un sistema de encastre, que combinándolas permiten configurar múltiples ángulos y la concurrencia de 2, 3 y 4 barras en cada nudo según se requiera.

Unión a 60°:

Se puede vincular con otra igual, con la unión a 45° y con la solitaria, admitiendo un máximo de 4 barras.

Unión a 45°:

Igual que la anterior se puede unir a la de 60° a de 45° y/o a la solitaria, admitiendo un máximo de 4 barras.

Unión solitaria:

Se puede unir a cualquiera de las anteriores para configurar un tercer ángulo variable o con otra igual admitiendo un máximo de 3 barras.

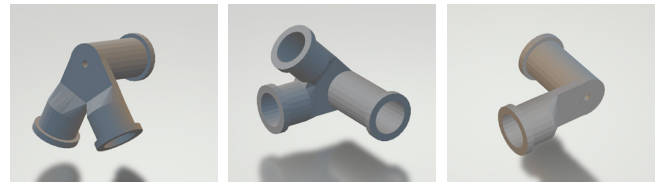


Figura 53: Unión a 60°, 45° y solitaria

Fuente: Elaboración propia

Sistema de encastre: Consiste en un medio tubo que permite unir el pico de la botella a los codos.

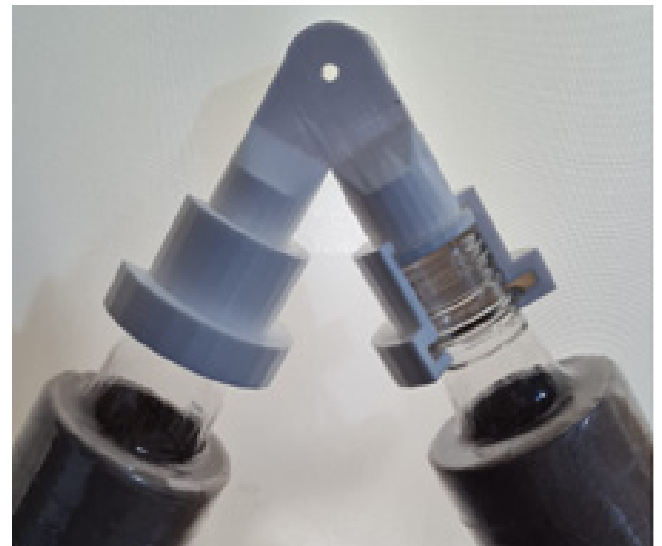


Figura 54: Encastre entre el pico de botella y unión a 45°

Fuente: Elaboración propia

Formas de vincularse:

Por medio de la unión con un tornillo, arandela y tuerca estos codos pueden unirse y formar diferentes ángulos como se puede observar en la Figura 55.



Figura 55: Unión entre codo a 45° y solitario
Fuente: Elaboración propia

• Proceso de montaje:

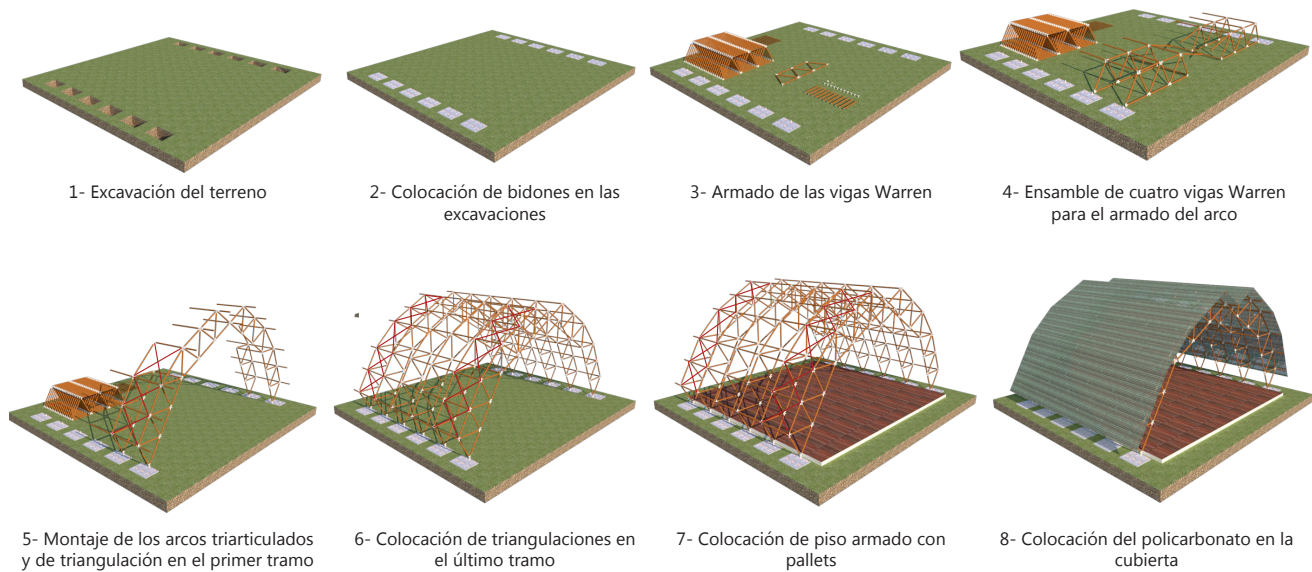


Figura 56: Proceso de montaje
Fuente: Elaboración propia

• Materialidad:

Los tubos de cartón utilizados para el desarrollo de este prototipo tienen las siguientes características geométricas:

Diámetro externo: 9 cm

Espesor de pared: 0.9 cm

Largo: 100 mm para las barras de la viga Warren y 140 cm para la barra conectora.

Dadas estas características y debido a la ausencia de ensayos sobre el material en la ciudad de Córdoba, se tomaron las características mecánicas de los tubos ensayados por Shigeru Ban (Tabla 9) descriptos en el capítulo 2.

Es importante aclarar que el uso de estos datos es solo a fin de demostrar su factibilidad, ya que es necesario la realización de ensayos del material conseguido en la ciudad de Córdoba para obtener resultados más ciertos. Estos ensayos podrían realizarse en el Taller de Investigación de Diseño Estructural de la FAUD – UNC.

Ensayos técnicos realizados por Shigeru Ban (Salado, 2006)

Tabla 9: Ensayos realizados por Shigeru Ban en el pabellón Japón (en la última columna se indican los valores de resistencia reducida en un 30% a los valores disponibles en la bibliografía, ver capítulo 2)

Ensayos	Proyecto	Dimensiones de los cuerpos de prueba	fc/ff máx (Kg/cm ²) (a rotura)	E (Kg/cm ²)	Tensión de diseño de referencia a compresión y flexión (Kg/cm ²)
Resistencia a compresión	Pabellón de Japón	100 x 22 x 240	95,3	15800	71,47
Resistencia a flexión	Pabellón de Japón	100 x 22 x 2000	145,2	14600	109,9

A partir de estos datos y de las características geométricas de los tubos que se consideraron pertinentes para utilizar en este diseño se elaboró la tabla 10:

Tabla 10: Tubos de diferentes diámetros internos y externos, con sus correspondientes momentos de inercia, área, radio de giro, esbeltez y carga crítica.

Fuente: Elaboración propia

Diámetro externo (cm)	Diámetro interno (cm)	I	Ag	r	Esbeltez		Pcritica (Kg)	
					L=100 cm	L=140 cm	L=100 cm	L=140 cm
10	5,6	450,8	53,9	2,89	34,6	48,44	7029,76	3586,61
10	7,6	333,18	33,17	3,16	31,64	44,3	5195,6	2650,81
9	7,2	193,68	22,9	2,9	34,48	48,27	3020	1540
5,5	3,5	38,25	20,69	1,35	74,07	103,7	596,46	304,32
5,5	4,9	16,92	17,75	0,97	103,09	144,32	263,85	134,61

La carga crítica de pandeo se obtuvo a partir de la ecuación de Euler

• Verificación:

Para la verificación del modelo se procedió a realizar un modelo matemático con el programa de cálculo RAM Elements. Para facilitar esta tarea primero se dibujó la geometría de la estructura en Autocad para luego importar un archivo dxf que pueda ser importado en el programa de cálculo.

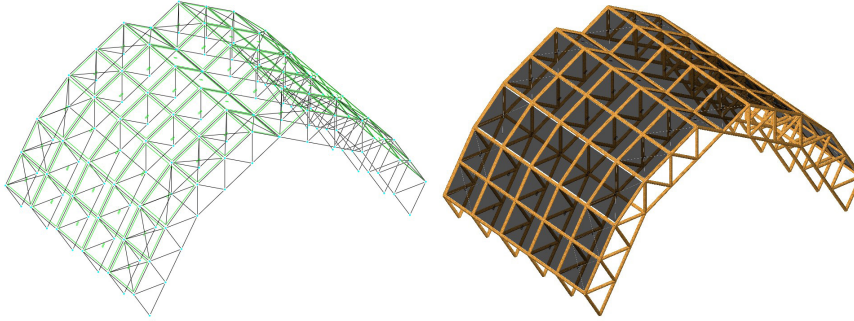


Figura 57: Modelado en RAM Elements
Fuente: Elaboración propia

Se tuvieron en cuenta las siguientes cargas:

Cargas muertas:

Peso específico del material de los tubos de cartón: 208 kg/m^3
El mismo fue tenido en cuenta automáticamente por el modelo.
Cubierta de policarbonato: 2 kg/m^2

Cargas vivas:

Accesible solo para montaje y posibles reparaciones: 30 kg/m^2

Cargas de viento:

La carga de viento se definió a partir de lo establecido en el CIRSOC 102-2005 (Tabla 11).

Tabla 11: Tabla para obtener la presión del viento

Fuente: Diseñada por el Arq. Nahuel Ghezan

162 km/h							
Velocidad básica del viento	Factor de direccionalidad	Factor de importancia	Factor de exposición	Efecto topográfico	Presión dinámica	Factor de efecto ráfaga	Presion considerando efecto ráfaga
V	Kd	I	Kz o Kh	Kzt	qz	G	qz.G
m/seg					[Kg/m ²]		[Kg/m ²]
45	0,85	0,87	0,58	1	53	0,85	45

El valor de la carga de viento obtenida se afectó por los coeficientes de presión, interior y exterior, correspondientes según se indican en la reglamentación.

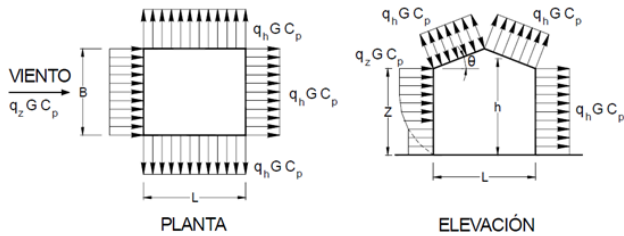


Figura 58: Coeficientes de presión para edificios cerrados total o parcialmente.
Fuente: CIRSOC 102-2005

Todos estos datos fueron cargados en el programa definiendo los diferentes estados y combinaciones de cargas en servicio. Las solicitaciones más desfavorables se obtuvieron para la combinación de carga D+W siendo D: carga muerta y W: presión y succión de viento según corresponda.

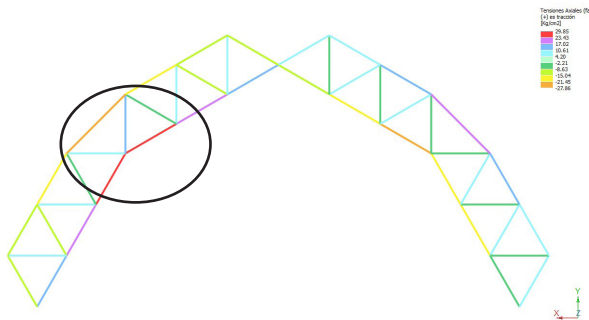


Figura 59: Sector con máximas solicitaciones en las barras para la combinación de carga D+W obtenida en RAM Elements
Fuente: Elaboración propia

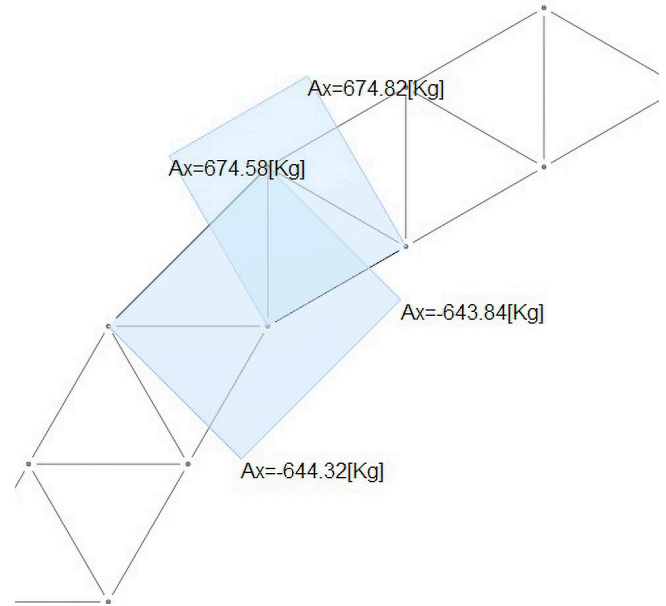


Figura 60: Máximas solicitaciones obtenidas para la combinación de cargas D+W
Fuente: Elaboración propia

Resultados:

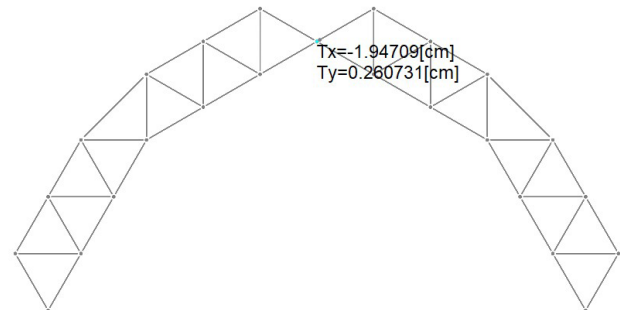


Figura 61: Desplazamientos (Tx) y descensos (Ty) para la combinación de carga D+W
Fuente: Elaboración propia

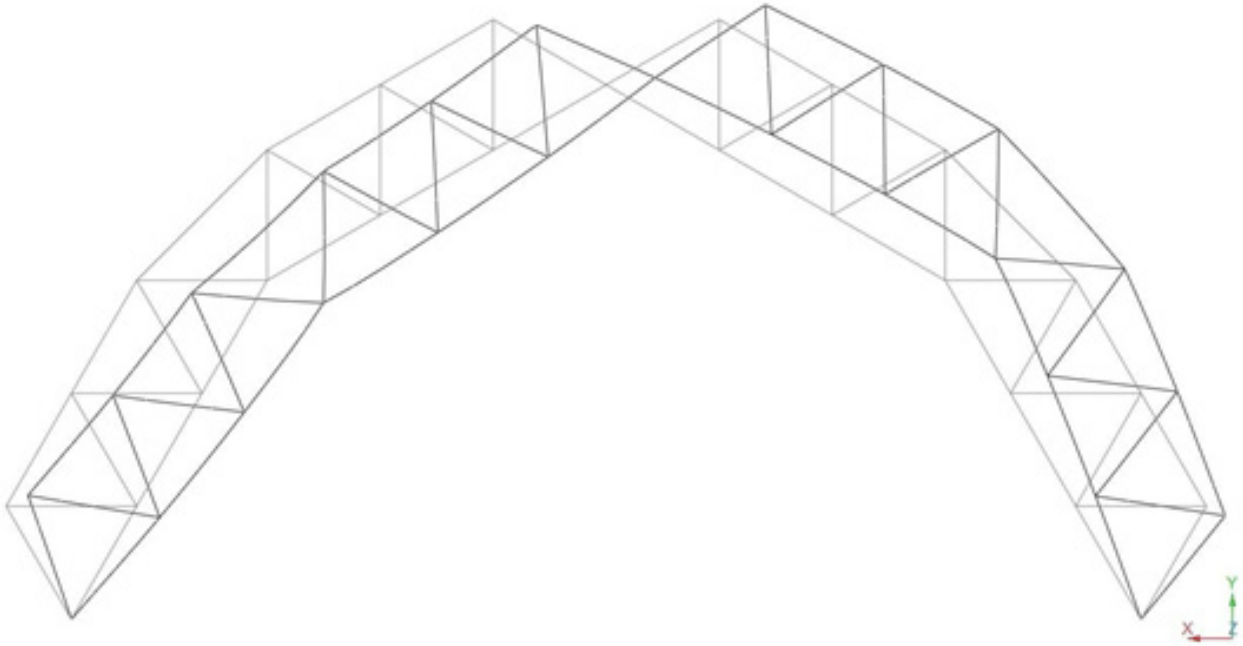


Figura 61: Deformaciones para la combinación de carga D+W
Fuente: Elaboración propia

Verificación de la sección a compresión:

Se obtienen de RAM Elements los valores de las máximas solicitaciones axiales de barras y a partir de los datos obtenidos en la tabla 10 se verifica la sección:

1540kg > 644kg

VERIFICA

Tabla 10

Diámetro externo (cm)	Diámetro interno (cm)	I	Ag	r	Esbeltez		Pcritica (Kg)	
					L=100 cm	L=140 cm	L=100 cm	L=140 cm
10	5,6	450,8	53,9	2,89	34,6	48,44	7029,76	3586,61
10	7,6	333,18	33,17	3,16	31,64	44,3	5195,6	2650,81
9	7,2	193,68	22,9	2,9	24,48	48,27	2020	1540
5,5	3,5	38,25	20,69	1,35	74,07	103,7	596,46	304,32
5,5	4,9	16,92	17,75	0,97	103,09	144,32	263,85	134,61

Con
clu
sio
nes

Conclusiones:

De la investigación y el análisis realizado se puede observar que la hipótesis planteada verifica. Esto se debe en primera instancia a que el material se encuentra disponible localmente para ser utilizado, a su vez por su configuración geométrica de barra permite el planteo de estructuras sistematizadas que admiten el diseño de diferentes configuraciones, y por último basada en las características mecánicas del material y a partir del diseño y modelado (en RAM Elements) del prototipo, se pudo obtener las solicitaciones y de esta manera verificar las secciones de los tubos de cartón.

Es importante destacar que las resistencias del material utilizadas se obtuvieron de las pruebas realizadas en las investigaciones de Shigeru Ban que se tomaron de base. Por este motivo, se recomienda realizar ensayos del material disponible en Córdoba para poder obtener resistencias más certeras.

Como era de esperarse a medida que aumenta la longitud del tubo, se reduce de manera importante su resistencia debido al pandeo, es por eso que se recomienda trabajar con tubos de mayores diámetros y espesores en caso de necesitar utili-

zar longitudes superiores a las utilizadas en este prototipo.

Si bien la utilización de estos tubos para la ejecución de arquitectura temporal es factible, es de suma importancia garantizar que los mismos tengan protección contra la acción del agua.

Con respecto a las uniones diseñadas, es importante tener en cuenta que si bien, la impresión 3D se puede realizar con filamentos reciclados el tiempo de impresión de cada elemento lleva muchas horas por lo que el uso de electricidad en exceso aumenta el impacto ambiental. También es importante remarcar que el filamento que debe utilizarse para el prototipo debe ser flexible para que facilite el encastre.

A partir de este trabajo queda abierta a futuras investigaciones el estudio de las resistencias de los tubos de cartón disponibles en la ciudad de Córdoba y el profundo análisis de las uniones planteadas para reducir su gasto energético. Sería interesante llegar a desarrollar una estructura escala 1:1 para realizar una prueba de carga.

**BI
BLIO
GRA
FÍA**

BIBLIOGRAFÍA

Blasco Rodríguez, C. (2012). Efímeras: alternativas habitables. *Pasajes arquitectura y crítica*, (124), 14-19.

Caleca, S. (2011). Pabellón Hermès: Shigeru Ban. *Diseño interior*, (227), 134-137.

Cantavalle S. (5 de abril de 2019). Historia del papel: desde los orígenes hasta hoy. [Mensaje de Blog]. Recuperado de <https://www.pixartprinting.es/blog/historia-papel/>

Correa, C. (2004). Designing with paper tubes. *Structural engineering international*, 14(4), 277-281.

Diez, G (2007). Diseño estructural en arquitectura. *No-buko*

Jodidio, P., & Ban, S. (2015). *Shigeru Ban: complete works 1985-2015*. Taschen.

Jodidio, P. (2011). *Temporary Architecture now*. Köln: Taschen.

McQuaid, M., & Ban, S. (2006). *Shigeru Ban*. Phaidon.

Medina, F. (18 de octubre de 2013) *Arquitectura de emergencia y de cartón* [Mensaje de Blog]. Recuperado de <http://www.revistaplot.com/es/arquitectura-de-emergencia-y-de-carton/>

Moisset de Espanés, D. (1992). *Intuición y razonamiento en el Diseño Estructural*. Bogotá: Escala Fondo Editorial.

Muñoz Mínguez, L. (2015). *Arquitectura de emergencia. Prototipos contemporáneos efímeros*.

Salado, G. (2006). *Construindo com tubos de papelão: Um estudo da tecnologia desenvolvida por Shigeru Ban*.

Sánchez Campos, R. (2016). *Arquitecturas efímeras con cartón: el caso de la village en cartón de Guy Rottier*.

Simonetti, I., & Fabre, R. (2015). *Estructuras y arquitectura*. Ingreso.

Talarico, W. (agosto, 2000) *Cardboard-tube construction highlighted at MoMA exhibit and at Expo 2000 in Germany*. *Architectural Record*, p.173.

Torroja, E., & Miret, E. T. (2007). *Razón y ser de los tipos estructurales (Vol. 13)*. Editorial CSIC-CSIC Press.

