



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Prefabricación; el papel de la prefabricación:
El papel del Papel

Autor

Cristina Ramos Cáceres

Director/es

Carlos Labarta Aizpún

Luis Miguel Lus Arana

Escuela de Ingeniería y Arquitectura. Universidad de Zaragoza

2014

Repositorio de la Universidad de Zaragoza – Zagan <http://zagan.unizar.es>

Resumen

El trabajo propuesto trata de responder a una inquietud fundamental sobre el papel que la prefabricación tiene, puede y debe tener en la práctica arquitectónica, contemplando qué posibilidades desde el punto de vista constructivo, económico y de diseño ha tenido desde una perspectiva histórica. Encontrado así, a partir del análisis y comparación entre diferentes escalas y materiales, el cartón, como un prefabricado con posibilidades de satisfacer las necesidades y tendencias de nuestro tiempo. Se propone un catálogo de soluciones constructivas que ayudan entender y comprender el uso del cartón como estructura principal de los proyectos, midiendo hasta dónde puede llegar este material, como elemento portante y aceptándolo como integrante del diseño en edificios.

Abstract

The proposed dissertation tries to answer fundamental issues questioning the real purpose that prefabrication has, could have and should have in the architecture practice, remarking the existing possibilities in constructive, economic and design issues from an historical point of view. It is found, from an analysis and comparison between the different scales and materials, the cardboard, as a prefabricated element with possibilities that could satisfy the existing needs and tendencies of our time. A catalogue of constructive details is proposed, helping to understand and comprehend the use of cardboard as the project main structure, measuring how far this material can get as a structural element and accepting it as an element integrated in the building design.

INDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	4
2. CONTRUCCIÓN Y PREFABRICACIÓN	6
2.1. La Galaxia IKEA.	6
2.2. Breve historia sincrónica de la prefabricación.	8
3. PREFABRICACIÓN Y SOSTENIBILIDAD: EL PAPEL DEL PAPEL	21
3.1 Madera y papel: hacia una construcción sostenible.....	21
3.2 Del papiro al papel. La celulosa y su aplicación en la construcción.	22
4. EL PAPEL Y SUS DERIVADOS COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN.	27
4.1 Procedencia y composición del papel	27
4.1.1 Fibras: Estructura del papel.....	27
4.2 Características físicas.	29
4.3 El papel como elemento constructivo y estructural	32
4.3.1 Láminas de cartón sólido y láminas de cartón corrugado.....	32
4.3.2 Cartón alveolar hexagonal.....	40
4.3.3 Tubos de cartón.....	46
5. CASO DE ESTUDIO. SHIGERU BAN	48
5.1 Breve biografía	48
5.2 Casos de estudio.....	50
5.3 Conclusión	56
6. ¿UN MUNDO DE PAPEL?	58
6.1 Límites	58
6.2 Posibilidades y Futuro	59
BIBLIOGRAFÍA.....	67
TABLA DE FIGURAS.....	69
TABLA DE TABLAS.....	70
ANEXO	71

1. INTRODUCCIÓN.

Habitar, construir, fabricar

Desde el inicio de la civilización, una de las necesidades primeras del hombre ha sido disponer de un lugar que habitar: un lugar encontrado, en un primer momento, y diseñado, construido o fabricado después, desde la *cabaña primitiva* de Laugier hasta los actuales rascacielos. Y en esta evolución, la técnica ha sido una componente inalienable de la arquitectura cuyo desarrollo ha apoyado en unos casos y alentado en otros la producción arquitectura. La historia de la técnica y sus avances es, en este sentido, una historia paralela que, en ocasiones, se confunde con la de la propia arquitectura, con solapes tan notables como el nacimiento de la modernidad, en que la propia estética de lo tecnológico sería apropiada para formular el canon de una nueva arquitectura. La transformación socioeconómica, tecnológica y cultural de la Industrialización, permitió la producción en masa (para la masa), permitiendo un desarrollo acelerado en muchos ámbitos, entre otros, el de la construcción. Sin embargo, si bien es cierto que la prefabricación, en su significado actual, está ligada históricamente a la industrialización, pero no es menos cierto que la prefabricación, de una u otra manera, ha estado presente desde el momento en que la construcción se vuelve algo colectivo; El ladrillo es un claro ejemplo; un elemento constructivo usado hace 11.000 años que se puede fabricar relativamente en serie usando moldes y apilarse de manera fácil de forma colectiva; el ladrillo jugaría un papel fundamental en el desarrollo urbano producido durante el neolítico en Oriente Medio y Asia Menor. La industrialización, no hizo sino mejorar el proceso de producción que debía responder a la alta demanda fomentada por el crecimiento económico. A partir de la industrialización, la construcción entra dentro de la producción estandarizada, comenzando a tener un papel cada vez más importante.

La prefabricación, la seriación, fueron uno de los leit motifs de la modernidad: un objeto de deseo, argumento y elemento de diseño, aunque situando al hombre en otra perspectiva ya que aparejado a una tan deseada mecanización que se convertía en fetiche, y en la que el hombre aparecía como un elemento exterior a su producción. Mostrando un escenario en que son las máquinas las que desarrollan el trabajo, la modernidad vislumbró un mundo de 'máximo confort' que llegaba a su extremo como en la película "Mi tío"¹ de Jacques Tati. Ahora que nos orientamos hacia un futuro progresivamente más mecanizado, ¿cuál es el papel y la forma que debe y puede tomar la prefabricación? Y, más aún, ¿cuál es su futuro, posible o deseable, en un mundo en que la conciencia ecológica tiene un papel cada vez más preponderante, por motivos tanto ideológicos como por propia necesidad? Actualmente hay una nueva tendencia del "Do it yourself", que retoma de alguna manera ese origen en el que se movía la prefabricación, la posibilidad de manejar una escala de objeto, como unidad constructiva, para poder transportarlo y construir un objeto aún mayor y más complejo. Desde la segunda posguerra, la arquitectura ha fijado una mirada cada vez menos marginal en la posibilidad de utilizar objetos cotidianos de escala humana como botellas, pallets, bolsas, papel, cajas de cartón para su reutilización en la construcción, respondiendo tanto a esta tendencia hacia la autoconstrucción, como a la

¹ Ver Tati, Jacques: *Mon oncle*, Gaumont Film Company, 1958

igualmente emergente conciencia ecológica, que busca en el reciclaje y la reutilización, cumpliendo con la deseada y cada vez más necesaria sostenibilidad.

Este trabajo parte, por tanto, de un interés particular en el papel de la prefabricación en la arquitectura, no únicamente desde una perspectiva histórica, sino como una posibilidad para el futuro, una curiosidad por sus límites, y sus posibilidades, tanto económicas y de diseño como desde un punto de vista puramente ético.

La prefabricación no es que sea una opción de futuro, porque actualmente ya está siendo una opción. Se pone en cuestión no sólo al fenómeno prefabricación (¿Cuáles son sus ventajas? ¿Cuáles son sus límites? ¿Y sus límites de escala? ¿ Es algo colectivo a escala humana o algo mecanizado a una mayor escala?), sino también al elemento prefabricado en sí; Hay ocasiones que su contexto de utilización, no corresponde con el contexto para el cual ha sido creado (como el cartón para empaquetar, utilizado en la construcción), y que por esta descontextualización, es obligada la relación y la mezcla entre otros ya existentes en el contexto; y es clave saber cómo puede hacerse esta conexión, no solo físicamente o formalmente, sino que también cómo afecta esto dentro de su desarrollo y producción industrial, y como afecta a la arquitectura de nuestro tiempo: ¿Qué posibilidades tienen estos elementos prefabricados descontextualizados para el diseño arquitectónico? ¿Y cuáles son sus posibilidades y sus límites para el diseño de un hábitat verdaderamente humano? Y, lo que es más: ¿Cuál puede ser el papel de estos elementos en la construcción de un mundo más sostenible? Y, por tanto ¿qué tipo de prefabricación es de la que estamos hablando?

2. CONTRUCCIÓN Y PREFABRICACIÓN

Una perspectiva histórico-escalar.

2.1. La Galaxia IKEA.

Si en su libro de 1962, Marshall McLuhan hablaba de 'la Galaxia Guttenberg'² para referirse a los cuatro siglos en los que la invención de la imprenta ha transformado progresivamente al mundo en una 'Aldea Global', en este comienzo del siglo XXI, quizá el mejor exponente de esta globalidad sea el de la empresa sueca IKEA, una cadena que ha revolucionado el mundo del diseño, con una facilidad en la producción creativa, diseño y estandarización de todo tipo de piezas para posteriormente poder montar un mueble en tu casa. Es una empresa que ha conseguido revolucionar el mundo actual, que ha cambiado incluso la manera de disponer nuestro hogar y que por tanto nuestra actitud dentro de él. Ha sido capaz de cambiar nuestra tendencia de poseer objetos de manera perpetua hacia el constante cambio de los objetos de nuestra casa (aumentando aún más la necesidad de la reciclabilidad de estos objetos) e incluso haciéndonos formar parte de su creación.

Esto puede llegar a ser un estudio antropológico de los humanos que habla sobre su hábito actual de cambio, provocado por el acelerado proceso de producción y avances tecnológicos que lleva en ocasiones a solapes entre tendencia actuales y tendencias anteriores; en el caso de IKEA recupera en la prefabricación la tendencia o concepto de autoconstrucción, mezclándolo con avances tecnológicos en la producción y diseño, creando un producto económicamente y ecológicamente viable, atendiendo al ciclo de vida de los objetos. A su vez, es irónico que IKEA tenga el lema 'la república independiente de tu casa', siendo que ahora casi en todas las ciudades del mundo existe el mismo salón o parecido, al que se propone (o se impone; dictadura IKEA)³ en sus catálogos como opción. Pero por tendencia, también a veces el humano no sigue las instrucciones IKEA, por muy fácil que sean, decidiendo investigar otra manera de ensamblaje y cambiando el uso para el cual ha sido creado.

Es un dicho popular, al parecer comúnmente aceptado 'ya está todo inventado'⁴. Por ello, quizás la clave no reside en crear algo nuevo sino en recuperar y reutilizar lo existente en un diferente contexto, de otra manera, lo que hace al elemento prefabricado no ser la consecuencia sino la causa del avance tecnológico. Esto es lo que ha llevado por ejemplo a utilizar recientemente (desde los años 50) materiales que han servido de embalaje, de contenedor de objetos para su transporte como las botellas utilizadas en el proyecto BottleDome⁵ o cajas de cartón, para llevar a cabo muebles como la silla Wiggle chair⁶, hecha a partir de cartón corrugado e incluso edificios con tubos de cartón como la Paper House⁷.

² Ver McLuhan, Marshall: *The Gutenberg Galaxy: The Making of Typographic Man*. London: Routledge & Kegan Paul, 1962

³ Ver Jaque, Andrés: *IKEA Disobedients: 9+1 Ways of Being Political*. exhibition at MoMA Ps1, 2012

⁴ Ver Eclesiastés (1-10): *Nihil novum sub sole, Nada nuevo bajo el sol*.

⁵ Ver StudioKCA: *Bottle dome*, Central Park, Nueva York, USA, 2013

⁶ Ver Gehry, Frank: *Wiggle Side Chair: Easy Edges collection*, 1972

⁷ Ver Ban, Shigeru: *Paper House. Estructura de Tubos de cartón*. Japón, 1995



Figura 0 [0.1] Bottle Dome, Studio KCA, Nueva York, Central Park, 2013. [0.2] Wiggle chair, colección Easy Edges, Frank Gehry, 1972. [0.3] Paper House, estructura de tubos de cartón, Shigeru Ban, Yamanashi, Japón, 1995

2.2. Breve historia sincrónica de la prefabricación.

prefabricado, da.⁸

1.adj Dicho de una casa o de otra construcción: Cuyas partes esenciales se envían ya fabricadas al lugar de su emplazamiento, donde solo hay que acoplarlas y fijarlas.

prefabricación⁹:

Sistema de construcción cuyo diseño de producción es mecanizado, en el que todos los subsistemas y componentes se han integrado en un proceso global de montaje y ejecución para acelerar su construcción.

También llamada construcción industrializada, construcción prefabricada

La prefabricación se caracteriza por: la producción de piezas en un lugar diferente al cual se van a ensamblar; el transporte de las piezas por la producción de piezas en una mínima escala y la manejabilidad de estas unidades mínimas constructivas de manera colectiva a la hora del ensamblaje, mecanizado o no según la escala que tenga la mínima pieza constructiva. Estas bases que definen la prefabricación hace pensar en que la prefabricación es un fenómeno presente desde antiguo, desde la fabricación de utensilios o armas, hasta que se introdujo en el mundo de la construcción, siendo la madera uno de los materiales más antiguos utilizados en este ámbito. El explicar y entender cómo ha ido evolucionando en cada época cada material en el ámbito de la construcción con piezas prefabricadas hasta su situación actual sería el punto de partida necesario para deducir encontrar los nuevos horizontes abiertos en la prefabricación, y prever las futuras posibilidades.

Esta tarea resulta, sin embargo, inabarcable dentro del ámbito de un trabajo como el que se presenta aquí, así que por ello se decidió utilizar un método que permitiera rastrear el fenómeno, ofreciendo una visión sintética, pero que a la vez permitiera vislumbrar la complejidad del fenómeno. Así pues, se optó por dividir el fenómeno en escalas, desde la menor a la mayor, a la manera en que Rem Koolhaas optó por explicar sus proyectos en SMLXL. Esta estrategia permite ver, en cada material, hasta que mayor escala ha dado de sí y hasta que escala se puede subdividir hasta encontrar su unidad mínima constructiva prefabricada.

Para poder entender mejor como han ido introduciéndose en la industria de la construcción los diferentes materiales, su desarrollo y su combinación, se optó pues por estudiar, ordenándolos cronológicamente, aquellos materiales más utilizados, populares, o que reflejan de mejor manera los diferentes campos de esta industria: Hormigón, acero, madera, plástico, y, más recientemente, el papel y sus derivados, muy especialmente el cartón.

⁸ Ver [RAE]: *prefabricado, da*. Fuente online, <http://buscon.rae.es/drae/srv/search?val=prefabricado>

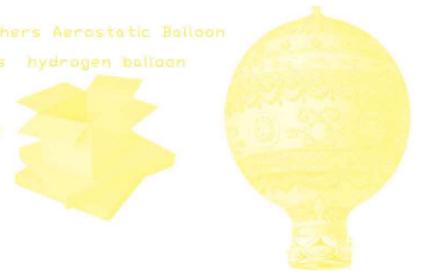
⁹ Ver [PARRO, Diccionario de arquitectura y construcción]: *prefabricación*. Fuente online, <http://www.parro.com.ar/definicion-de-prefabricaci%F3n>

XL



7500 a.C Brick

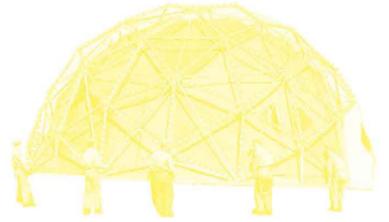
1783 Montgolfier Brothers Aerostatic Balloon
1783 Jacques Charles hydrogen balloon



1817 First corrugated paperboard BOX

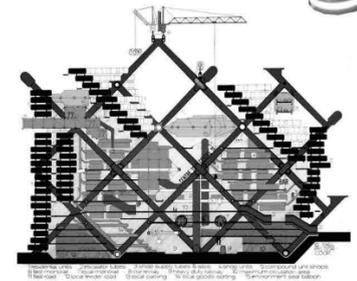
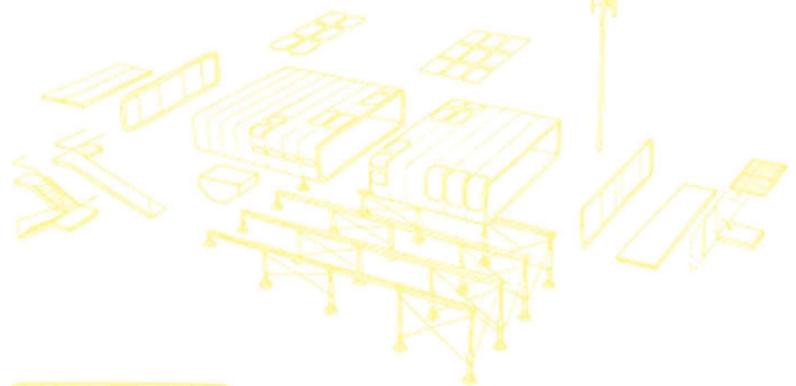
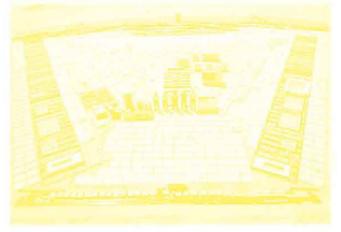
1853 Colnet First reinforced concrete structure

1940 Buckminster Fuller Bathroom



1945 Geodesic Dome + Dynaxion house

1945 Demontable house Jean Prouvé



1947 Lustron House Carl Standlund

1964 Peter Cook Plug in city

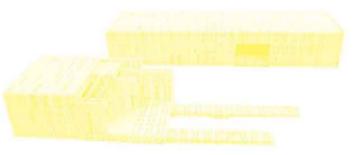


1968 Richard Rodgers Zip up enclosures



2005 Keetwanen Tengohouse

2007 Permanent camping Casey Brown



2008 Pallet House

2012 Vaya Faro. Desenfreno

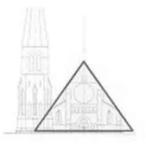
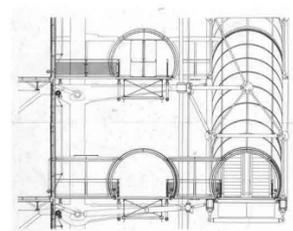
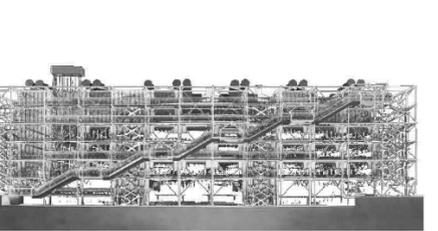


2012 Globus Popus

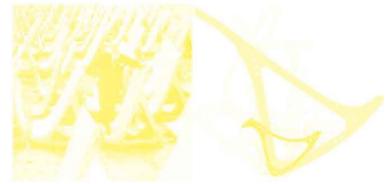
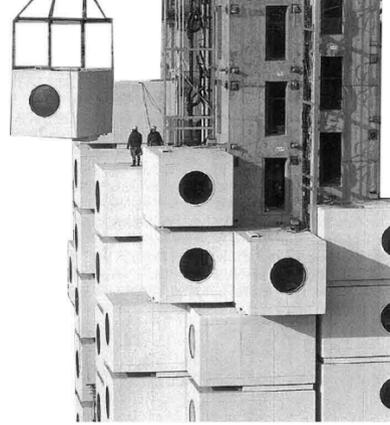
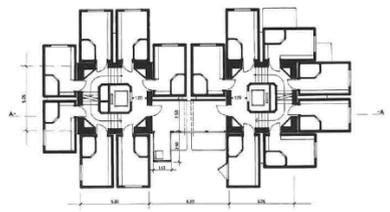
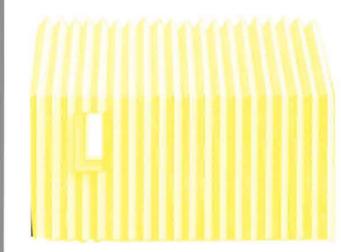
2012 WHITE_cameleon House

2012 Amid bajo.=9 Golden dome

2013 Bottle dome. StudiaKCA

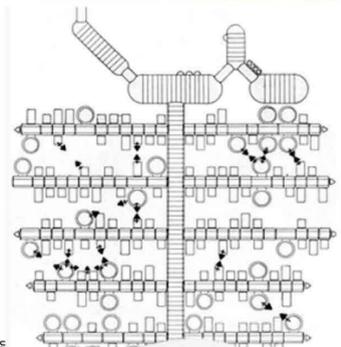


2013 Shigura Ban Church Australia



1913-2006 Fisac Bones

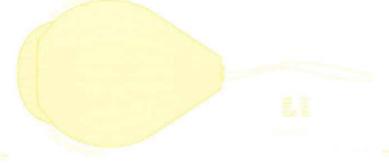
1947 First Plastic Bottle

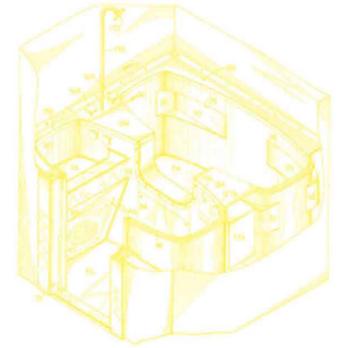
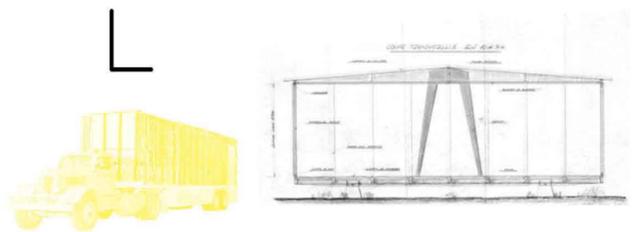


1971 Prada Poole instant city

1972 Nagakin Towers Korukagua

1977 Pampidou Richard Rodgers Renzo piano





7500 a.C Brick

1783 Montgolfier Brothers Aerostatic Balloon
1783 Jacques Charles hydrogen balloon



1817 First corrugated paperboard BOX



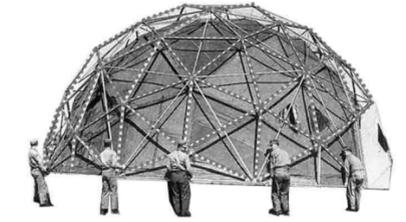
1924 Wooden Pallet
1937 Rowe Allen Foldable seat



1853 Cognac First reinforced concrete structure

1940 Buckminster Fuller Bathroom

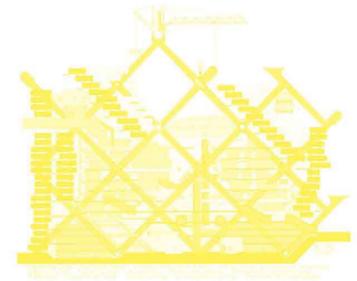
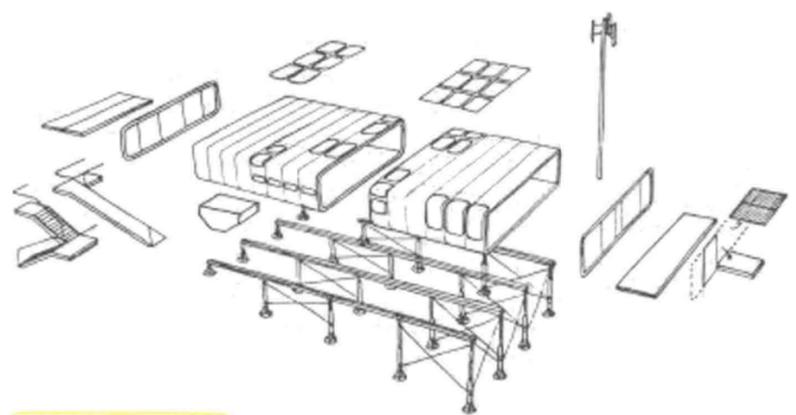
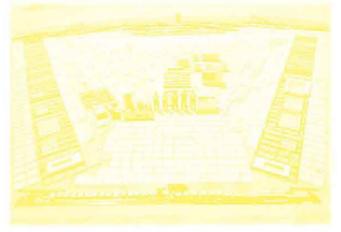
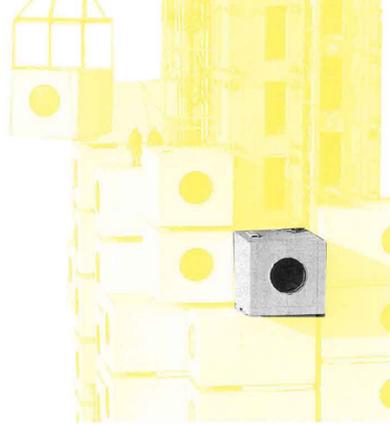
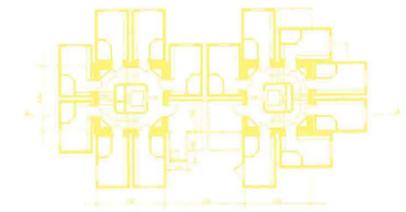
1945 Demontable house Jean Prouvé



1945 Geodesic Dome + Dynaxion house

1913-2006 Fibac Bones

1947 First Plastic Bottle



1947 Lustron House Carl Standlund

1964 Peter Cook Plug in city

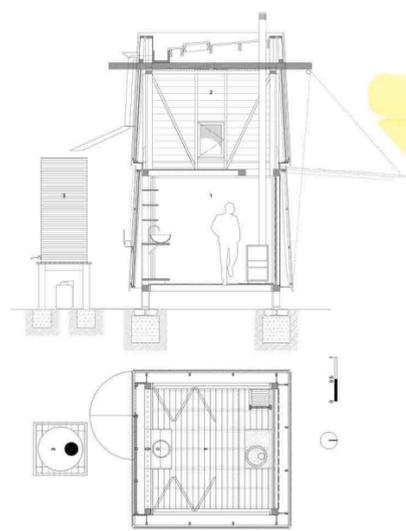
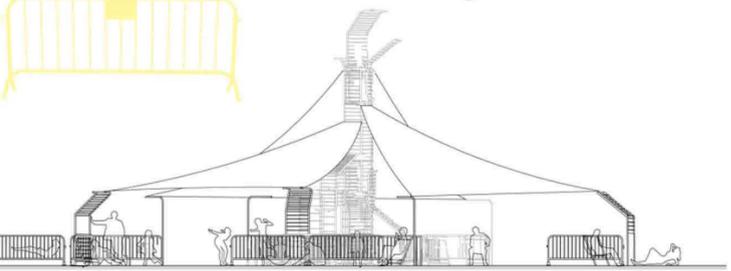
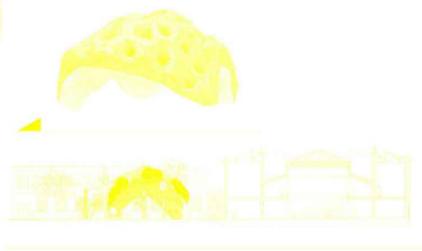
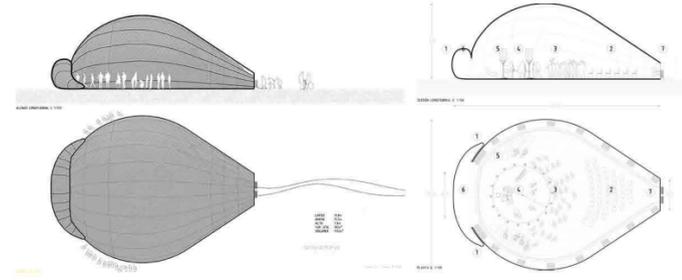
1968 Richard Rogers Zip up enclosures



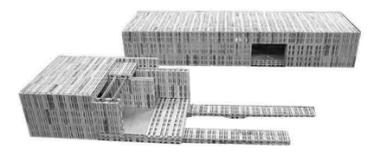
1972 Frank Gehry wiggle Chair Vitra

1972 Nagakin Towers Korukagua

1977 Pompidou Richard Rogers Renzo piano



2005 Keetwonen Tempohouse
2007 Permanent camping Casey Brown



2008 Pallet House

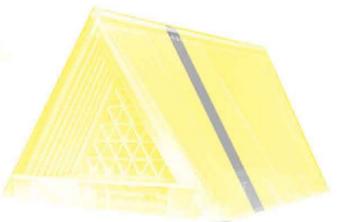
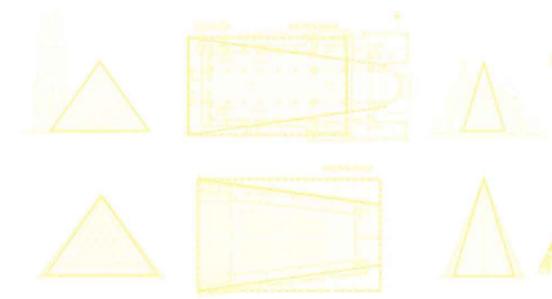
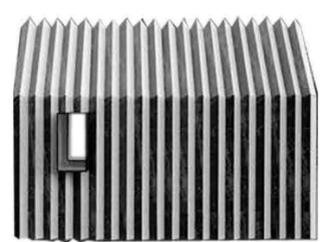
2012 Vaya Faro. Desenfreno



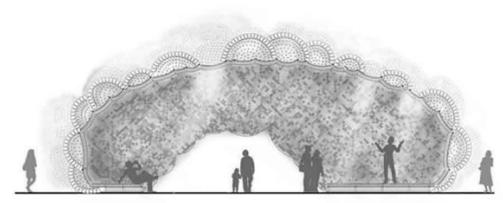
2012 Globus Popus

2012 WHITE.cameleon House

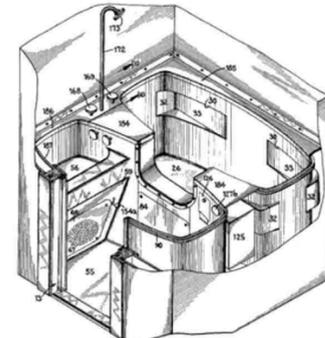
2013 Bottle dome. StudioKCA



2013 Shigura Ban Church Australia



M



7500 a.C Brick

1853 Coignet first reinforced concrete structure

1940 Buckminster Fuller Bathroom

1945 Demontable house Jean Prouvé

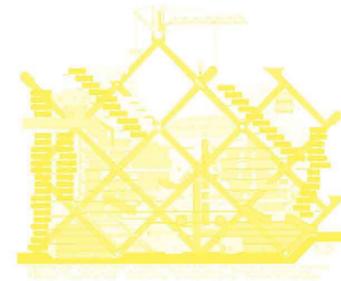
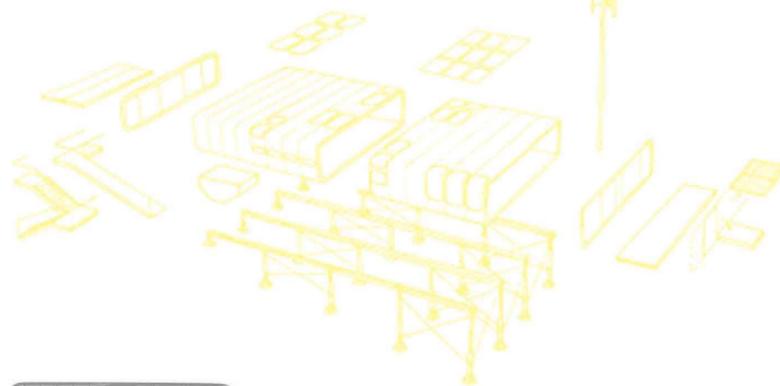


1945 Geodesic Dome Dynaxion house



1947 Lustron House Carl Standlund

1964 Peter Cook Plug in city



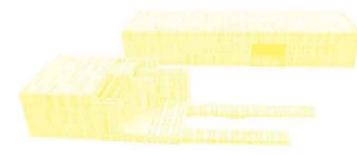
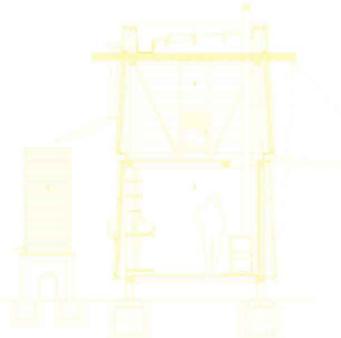
1968 Richard Rogers Zip up enclosures



1995 Paper Log House-Kobe

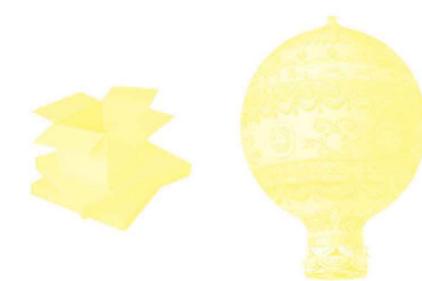
2005 Keetwanen Tempohouse

2007 Permanent camping Casey Brown



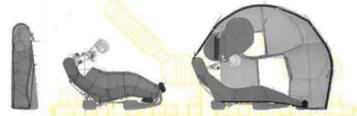
2008 Pallet House

2012 Vaya Faro. Desenfreno



1913-2006 Fisac Bones

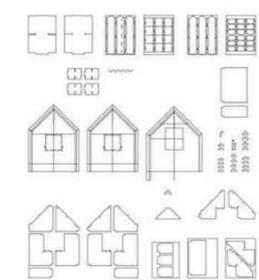
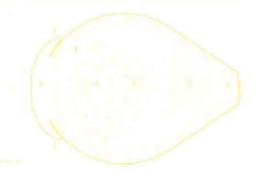
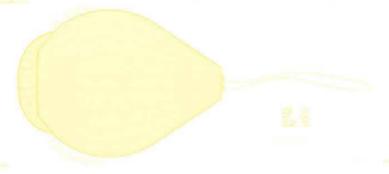
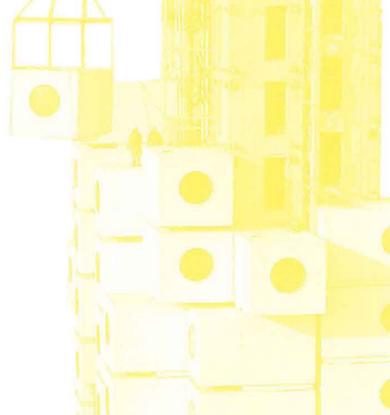
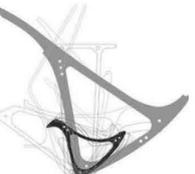
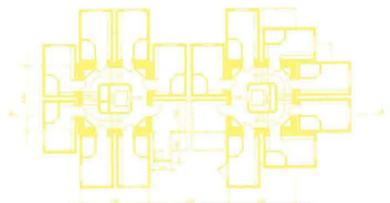
1964 Mike Webb Cushicle



1971 Prada Pool instant city

1972 Nagakin Towers Korukagus

1977 Pompidou Richard Rogers Renzo piano

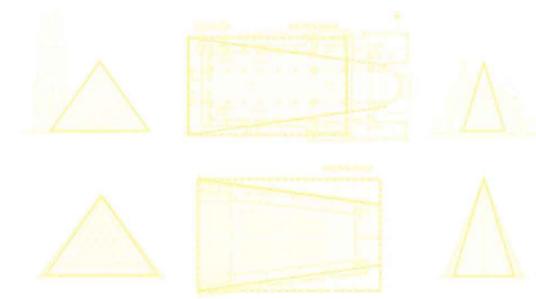
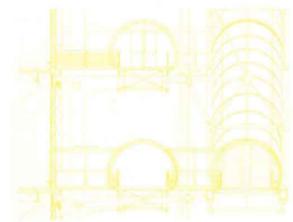
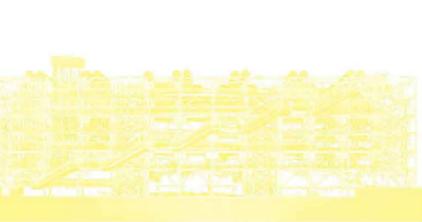
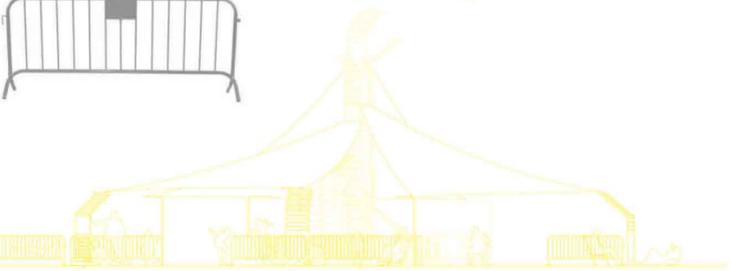
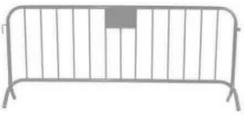
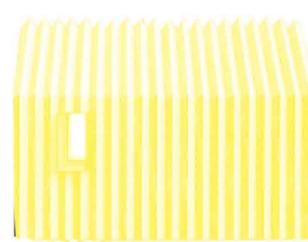


2012 Globus Popus

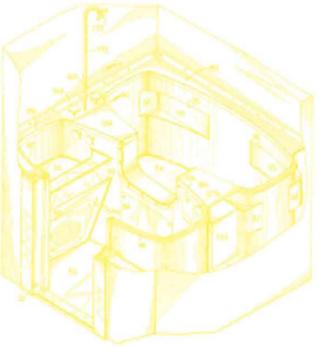
2012 WHITE.cameleon House

2012 Amid ba.jo.=9 Golden dome

2013 Bottle dome. StudioKCA



S

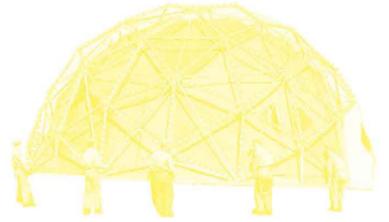
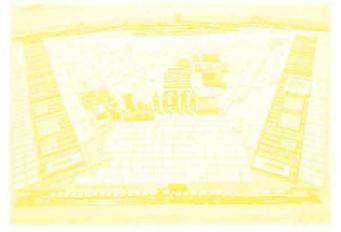
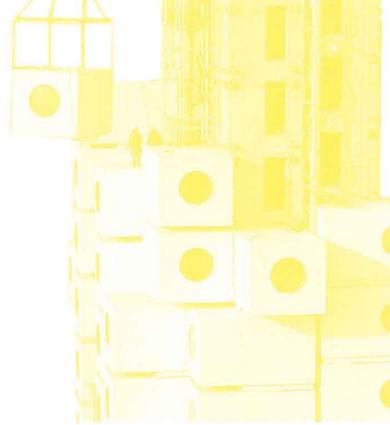
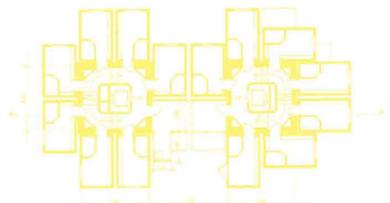


7500 a.C Brick

1783 Montgolfier Brothers Aerostatic Balloon
1783 Jacques Charles hydrogen balloon



1817 first corrugated paperboard BDX



1945 Demontable house Jean Prouvé

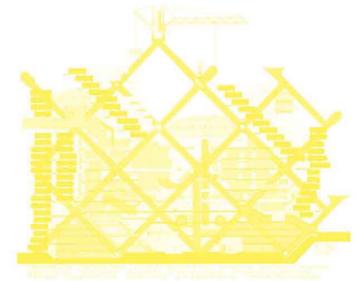
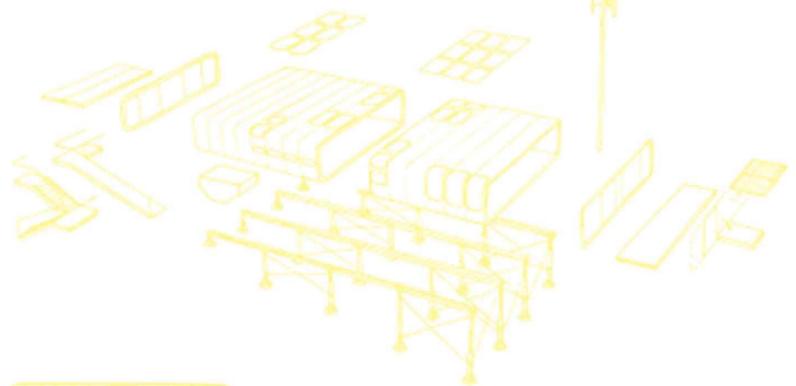
1945 Geodesic Dome + Dynaxion house

1924 Wooden Pallet
1937 Rowe Allen Foldable seat



1913-2006 Fisac Bones

1947 First Plastic Bottle



1947 Lustron House Carl StandLund

1964 Peter Cook Plug in city

1968 Richard Rodgers Zip up enclosures

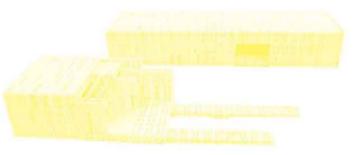
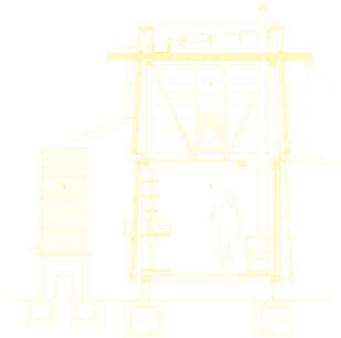
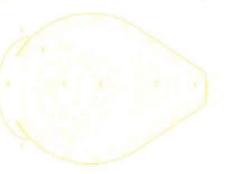
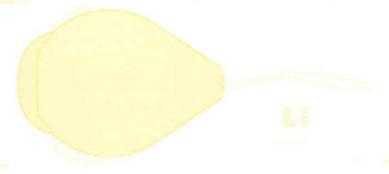


1972 Frank Gehry wiggle Chair Vitra

1971 Prada Poole instant city

1972 Nagakin Towers Korukagua

1977 Pampidou Richard Rodgers Renzo piano



2008 Pallet House

2012 Vaya Faro. Desenfreno

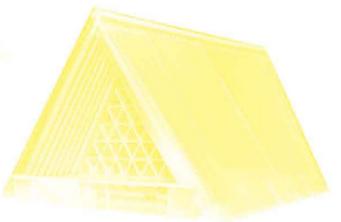
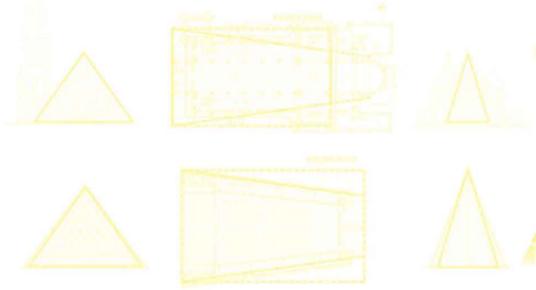
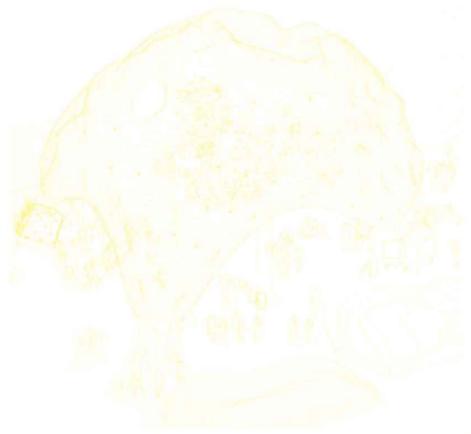


2012 Globus Popus

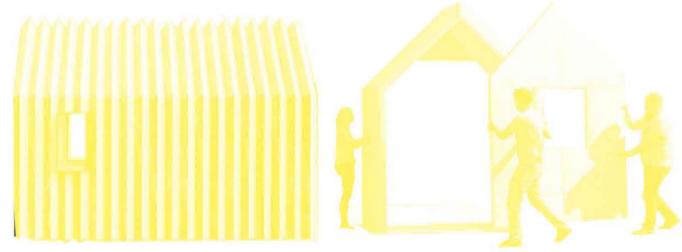
2012 WHITE.cameleon House

2012 Amid bajo=9 Golden dome

2013 Bottle dome, StudioKCA



2013 Shigura Ban Church Australia



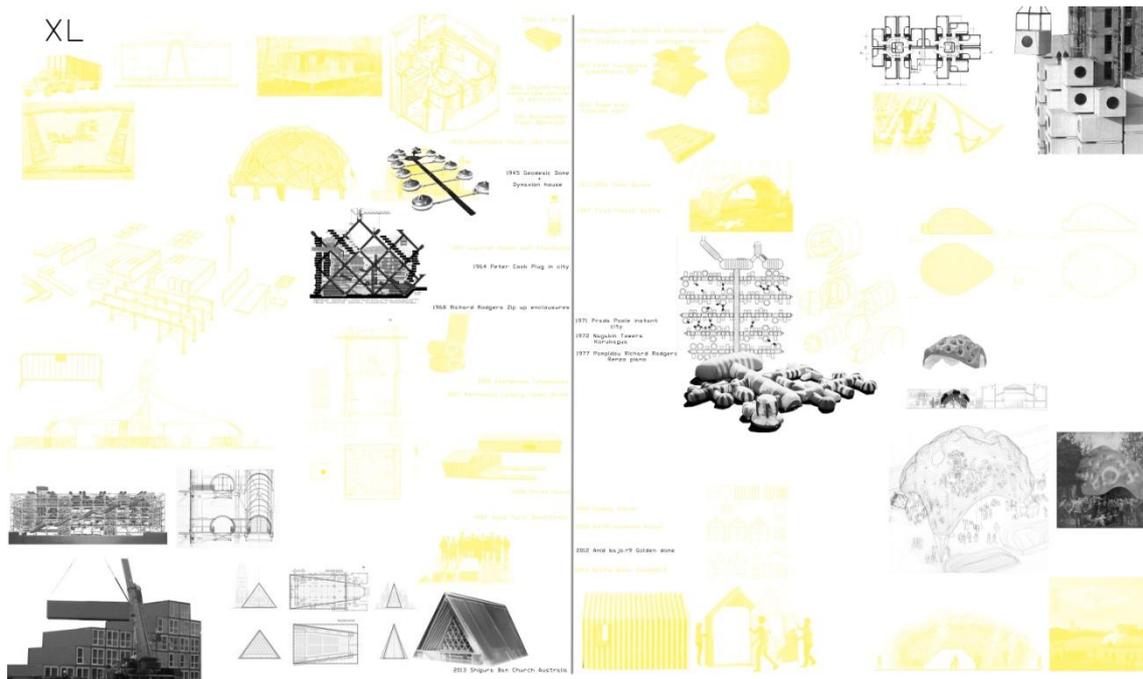


Figura 1. Escala XL; escala de edificios o superior

En la talla XL, correspondiente a la escala del edificio o superior, (figura 1) vemos un ejemplo como la cúpula Golden Dome¹⁰, siendo un solo elemento, en este caso un hinchable, que puede transportarse de un evento a otro como una unidad. Al contrario ocurre con el resto de ejemplos dentro de esta escala XL, donde existen otras sub-escalas; Las torres Nagakin de Kurokawa¹¹, la ciudad hinchable de Prada Poole¹², la ciudad mecanizada de Peter Cook¹³, el edificio Tempohouse¹⁴, que en su conjunto son cuerpos o sistemas prefabricados pero compuestos por unidades habitacionales prefabricadas de una escala menor, la escala L. El centro Pompidou¹⁵ y la catedral de cartón de Shigeru Ban¹⁶, son casos en los que también existen unidades de una escala menor aunque, son unidades constructivas de escala L, pero no son habitables, siendo piezas meramente estructurales como tubos de cartón de 20 metros de largo en el caso de la catedral de cartón.

¹⁰ Ver Moreno Diaz, Cristina & García Grinda ,Efrén: *Golden Dome. Amidcero9**, 2012

¹¹ Ver Kurokawa, Kisho: *Nagakin Capsule Towers*. Shimbashi,Tokyo, 1972

¹² Ver Poole, Prada: *Instant City*, 1971

¹³ Ver Cook, Peter: *Plug in city*, 1964

¹⁴ Ver Keetwoonen: *Tempohouse*, 2005

¹⁵ Ver Rodgers, Richard & Piano, Renzo; *Pompidou centre*, París , 1977

¹⁶ Ver Ban, Shigeru: *Cardboard cathedral*, Christchurch, Nueva Zelanda, 2013

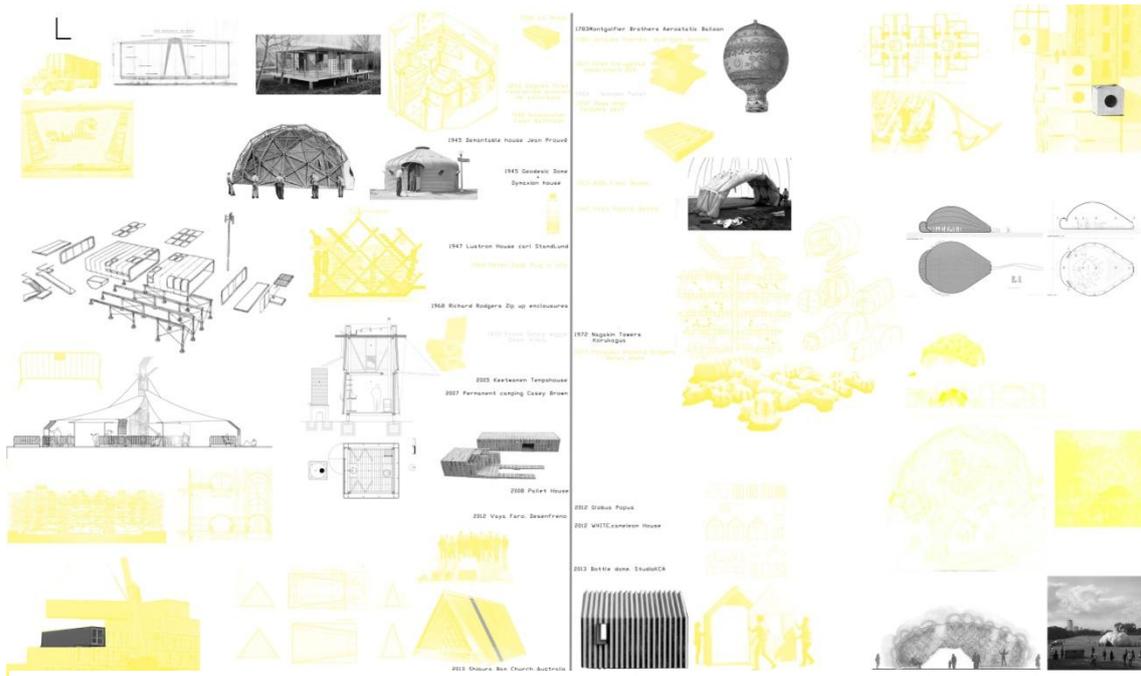


Figura 2. Escala L; escala de unidades habitacionales.

Se encuentran otras unidades habitacionales en la escala L (figura 2), pero independientes, sin formar parte necesariamente de un conjunto mayor, como por ejemplo la cúpula geodésica¹⁷, la casa Dymaxion, el globo aerostático de los hermanos Montgolfier¹⁸ o la sala hinchable de Globus Popus¹⁹, globo compuesto de nailon de alta resistencia, para albergar pequeños eventos en su interior. Tamizando esta escala a un grano fino, existen proyectos con piezas en la siguiente menor escala; la casa prefabricada de Richard Rogers²⁰, y la casa Camaleón²¹, se componen de una sección diseñada, dimensionada y producida de manera específica, dispuesta repetidas veces se va dando longitud a la casa. La casa desmontable de Jean Prouvé²² y la casa de Casey Brown²³ o las costillas de Fisac²⁴ son proyectos que ensamblan piezas prefabricadas de escala M como vigas, planchas, pilares...etc.

En esta escala L encontramos un último grupo que utiliza también piezas prefabricadas de una escala inferior, escala M, pero piezas que no han sido diseñadas específicamente para su ensamblaje y construcción, sino piezas prefabricadas sacadas del uso para el cual han sido creadas, lo que diferencia al grupo notablemente del resto. Hablamos de proyectos como la cúpula de botellas, Bottledome²⁵ compuesta por una subestructura que soporta las

¹⁷ Ver Buckminster Fuller, Richard: *Geodesic Dome + Dymaxion House*, USA, 1945

¹⁸ Ver hermanos Montgolfier: *Globo aerostático*, 1783

¹⁹ Ver Desnordfreno: *Globus Popus*, Herrera del Duque, Badajoz, 2012

²⁰ Ver Rogers, Richard: *Zip up enclosures*, 1968

²¹ Ver WHITE: *Cameleon house*, 2012

²² Ver Prouvé, Jean: *Demontable house*, 1945

²³ Ver Brown, Casey: *Permanent camping*, Australia, 2007

²⁴ Ver Fisac, Miguel: *Huesos de Fisac*, 1913-2006

²⁵ Ver StudioKCA: *Bottle Dome*, NY, 2013

una doble capa de botellas de plástico; el proyecto de Desenfreno²⁶ utilizando vallas de tráfico o la casa PalletHouse²⁷, compuesta por pallets.

Podríamos pensar que se podría incluir la Catedral de tubos de cartón en Christchurch de Shigeru Ban en este grupo, ya que utiliza un material como el cartón para la estructura. Sin embargo, utiliza un material fuera de su contexto habitual (papel, al fin y al cabo como elemento estructural) , pero no lo hace a partir de una pieza prefabricada que se recicla para otro uso, (e.i: si se utilizara una caja de cartón destinada al almacenaje como elemento base para construir una casa). Por ello, queda fuera de ese grupo. Si es cierto que Shigeru Ban cuando tiene que hacer las viviendas de emergencia PaperLog House-Kobe²⁸, utiliza además de cajas de cerveza, tubos de cartón de una fábrica de tubos de cartón de la zona.

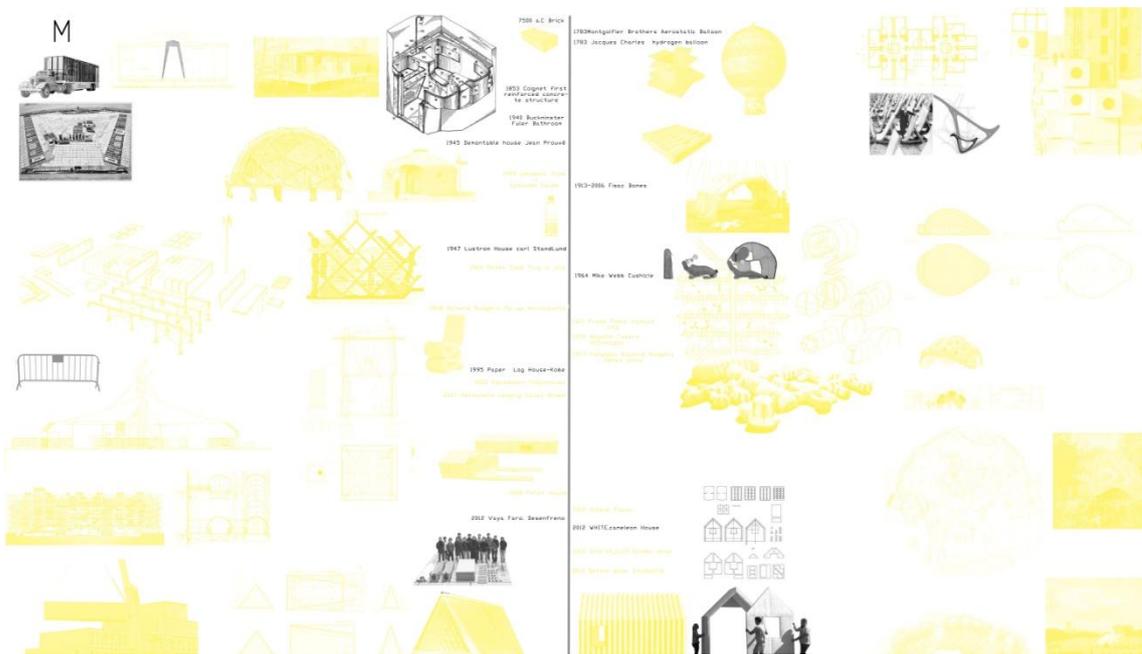


Figura 3. Escala M; escala humana.

La escala M (figura3), comprende la escala del espacio vital del ser humano, *la escala humana*; proyectos como Cushicle²⁹ o el baño prefabricado de Richard Buckminster Fuller³⁰ de 1940 son proyectos que atienden al mínimo espacio que sirve al ser humano, pudiendo referirnos a ellos como cápsulas vitales prefabricadas.

Las piezas o unidades más pequeñas prefabricadas pertenecen a la escala S (figura4); en esta escala ya se produce una clasificación más puramente atendiendo al material, hablamos de la pieza prefabricada del material en concreto: el ladrillo de arcilla, la botella en plástico, la caja o la silla de papel, el pallet de madera,... Estas representan las unidades de mínima escala, pero no por ello son las unidades mínimas absolutas, ya que cada escala contiene su propia unidad mínima.

²⁶ Ver Desenfreno: *Vaya Faro*, Benicassim, Valencia, 2012

²⁷ Ver schnetzer andreas claus and pils gregor: *Pallet House*, Venice architecture biennale, 2008

²⁸ Ver Ban, Shigeru: *Paper Log House-Kobe*, Kobe, Japón, 1995

²⁹ Ver Webb, Mike: *Cushicle*, Archigram, 1964

³⁰ Ver Buckminster Fuller, Richard: *B. Fuller Prefabrecated Bathroom*, 1940

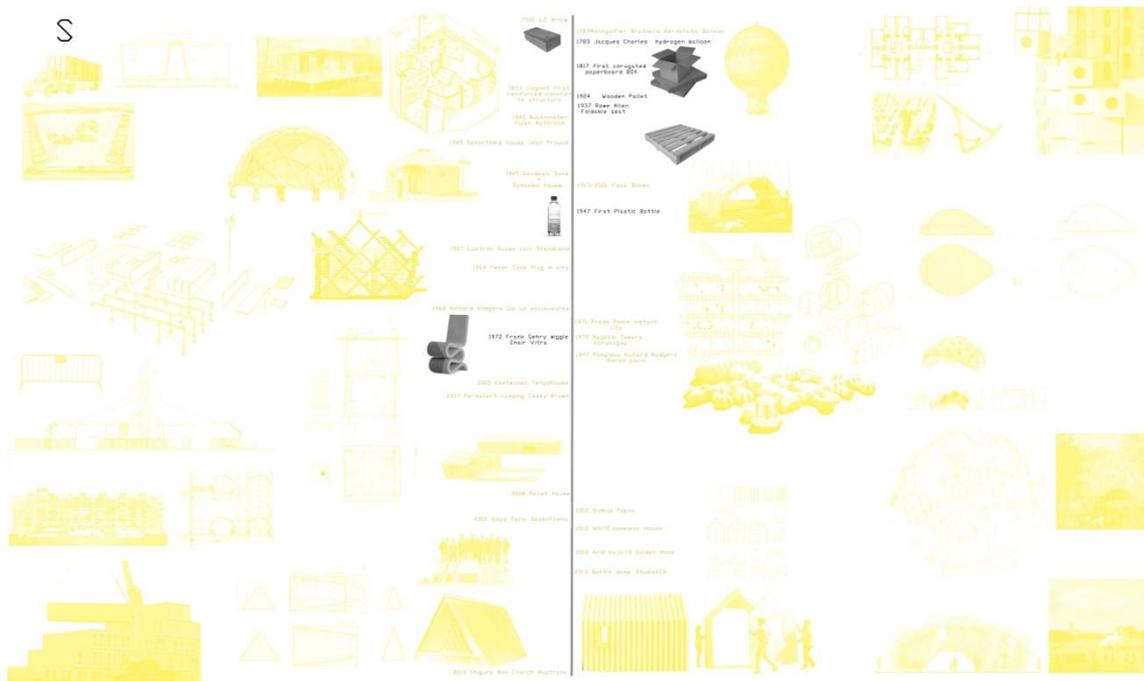


Figura 4. Escala S; escala del material

La evolución histórica de cada tipo material y su uso en el mundo de la prefabricación tiene un desarrollo lógico paralelo al de la escala; es obvio que antes de haber una casa de ladrillo existió antes el ladrillo. Conforme va avanzando la historia las piezas van introduciéndose en una escala mayor, pero hay veces que ocurre lo contrario, como es por ejemplo el caso de Miguel Fisac, que pensó la viga como un elemento único, sino como la suma varios elementos a modo de huesos. La prefabricación implica ambas reflexiones; la construcción y la deconstrucción: Saber en qué mínima y en qué máxima talla se puede llegar a componer una pieza prefabricada en un material y a qué talla puede llegar a ser ensamblada, es un análisis de ambos extremos (el de inferior escala y el de mayor escala), pudiendo conocer sus límites y así sus posibilidades, no solo estructurales, sino también atendiendo a su uso y ciclo de vida. Hay una gran diferencia entre Reciclado, Re-utilizar con el mismo fin Re-utilizar con distinto fin (Re-purposed). Siendo todo parte del ciclo de vida de una pieza prefabricada; reciclar una pieza es llegar no a su mínima escala, sino a la materia en sí, comenzando un nuevo ciclo de vida en otra pieza. Reutilizar sí concibe la pieza, la unidad mínima, dando otra oportunidad a la pieza; de-construir para volver a re-construir (sobre lo mismo). Ahora bien, si hablamos de re-purposed, es una reutilización pero con cambio de objetivo; de-construir para construir (otra cosa). Vemos ejemplos recientemente de este fenómeno (re-purposed) como las botellas, los pallets o las cajas de cartón; Los pallets podrían no estar en este grupo ya que no dejan de ser subestructura de madera, parecidas al conocido sistema de *Balloon Frame*, por tanto la reutilización es relativa, quedando así sólo uno, de los casos anteriores, que ha llegado a componer verdaderamente estructuras portantes, desde una cabaña (escala S) hasta templos (escala XL) a través de estos fenómenos (reciclado, reutilización, re-purposed) y este es el caso del cartón. Por ello, se decide enfocar el trabajo hacia las aplicaciones del papel y sus derivados en arquitectura, su uso histórico, y sus posibilidades, tanto constructivas como de diseño, habida cuenta de su característica de material ligero, renovable, y posibilidad de reciclaje, así como su naturaleza biodegradable, que hace de él un material particularmente sostenible.

3. PREFABRICACIÓN Y SOSTENIBILIDAD: EL PAPEL DEL PAPEL

3.1 Madera y papel: hacia una construcción sostenible.

La madera, un material sacado directamente de la naturaleza, sin apenas haber sido procesado industrialmente, cuyo papel en la construcción, más allá de los acabados, parecía superado a finales del siglo XIX con la aparición de los nuevos materiales (acero, vidrio, consolidación del hormigón armado), y que sin embargo, reapareció con una fuerza renovada a finales del siglo XX, debido a la generalización del uso de maderas laminadas y contra-laminadas (ampliaron su uso estructural), los nuevos tratamientos superficiales (mayor resistencia a la humedad), o el uso de máquinas de control numérico (mejora de sus posibilidades de diseño y precisión).

La prefabricación ha ofrecido una variable fundamental y es la recuperación de los materiales utilizados en la construcción, mediante el desmontaje de las piezas anteriormente ensambladas. Permiten una deconstrucción parcial o total, pudiendo remodelar el diseño y su mejorar su calidad a lo largo de su vida útil. ¿Pero cuál es el material idóneo para ello?

Algunos arquitectos recientemente como Brufau constataron que la arquitectura debería volver a ser de madera por su valor ecológico y su relativa abundancia. Sí, es cierto que la madera dentro del ámbito de la construcción está en muchos estados. Ya se ha mundializado la utilización del DM y otros conglomerados y derivados que recuperan los desechos de esta materia prima. La facilidad de reciclado, producción de piezas y transporte le hace ser uno de los candidatos para ser, en cualquiera de sus estados, el material de este nuestro siglo.

“No podemos construir estructuras que pesen más que las sobrecargas que tienen que aguantar. (en peso, en tiempo y en dinero)”_ Robert Brufau³¹

Así, no siendo ni mucho menos un material novedoso, la madera, se revela como un material de futuro, pudiendo responder junto con otros materiales a diferentes exigencias técnicas. No sólo como componente material de estructuras puramente de madera o de estructuras híbridas, sino también en su descomposición propia del material, ya que ha sido posible derivar la madera a un material como el cartón, siendo utilizado recientemente en el mundo de la construcción.

“El papel es madera en otro estado”_ Shigeru Ban³²

³¹ Ver Pérez, José: *Entrevista a Robert Brufau*, Diario de noticias de Navarra, Pamplona, 31 diciembre 2006

³² Ver McQuaid, Mathilda: *Shigeru Ban*, Phaidon, NY, 2003. pg 14

3.2 Del papiro al papel. La celulosa y su aplicación en la construcción.

El cartón es madera en otro estado, pero esto puede ser un tema en el que se puede profundizar ya que técnicamente la madera antes de poder ser cartón, es papel. El papel se descubrió en China en la época de la antigua dinastía Han año 875 a.C. Procede de una especie vegetal conocida en oriente denominada Mullberry. Desde entonces en la tradición oriental ha sido muy considerado el papel dentro de su cultura. Pawashi, Nagashizuki, Shoji, Fusuma... son nombres que hacen referencia a diferentes maneras de utilizar textiles que han sido confeccionados principalmente a partir del papel. En algunas ocasiones el papel era gran sustituto de la seda oriental hizo crecer la demanda.

La sutileza y ligereza (literalmente) con la que se consigue la división de espacios (puertas correderas, tatamis...) y facilidad para ser producido y transportado y su resistencia a pesar de ser nada más que una lámina capaz de generar sombras y sombreados (cosas muy diferentes) hizo capaz la popularización de este material. La necesidad de difusión de este material, causó el cambio y desarrollo de sus métodos de producción. Una vez llegó a Occidente, el papel no tomó un papel tan popular como el de ser un soporte para la escritura hasta el S.XIX; La superposición de capas y capas de láminas de papel encoladas hizo que el papel adquiriese más grosor, más dureza y más resistencia es lo que finalmente, después de varias etapas de desarrollo y mejora del material, llegaríamos a denominar como cartón. Ya antes, con estos métodos de encolar superponiendo láminas de papel, comenzaron a aparecer los primeros tubos de cartón para enrollar sobre ellos telares o hilos e incluso eran utilizados para rigidizar sombreros de copa para caballeros.

Entre los acontecimientos que han marcado la evolución del uso del papel como material, podríamos destacar los siguientes, que nos ofrecen un 'timeline' de su desarrollo como elemento de construcción:

1871 En 1871, Albert Jones consiguió la patente de cartón corrugado o ondulado, lo que permite hoy en día al cartón tener más resistencia al apilamiento o BCT (Box Compression Test). Su uso principalmente era el de proteger objetos ante golpes.

1874 Oliver Long en 1874 patentó el uso de dos simples láminas lisas entre las cuales la lámina corrugada de papel mejoraba su estabilidad. Esto es lo que ahora conocemos como cartón.

1889 En 1889 se conoce una de las primeras "estructura" de cartón cilíndrica producida industrialmente. Su uso era proporcionar una base cilíndrica de cartón resistente la cual se bañaba en cera sobre la que se grababan canciones para el gramófono inventado por Edison. También su comercialización se hacía en cajas cilíndricas de cartón.

1890 Robert Gair, en 1890 consiguió la patente de la caja de cartón pre-cortada y marcada con unas proporciones para poder ser plegadas para su posterior uso. Esto fue todo un avance ya que gracias a eso podían disponer de muchas más cajas en mucho menos espacio en el almacén y durante su transporte si iban vacías.

1899 En 1899 la empresa conocida como Southern Novelty Company, actualmente conocida como Sonoco, empezó a producir conos de cartón para bobinar hilos y lanas.

1900 Una empresa de cartón de Michigan, en 1900, patentó la mítica caja de cartón para los cereales (Corn-flakes). Esto fue una revolución ya que se empezó a integrar como concepto y como hábito el envasar y empaquetar la comida.

- 1904** Alrededor de 1904 James Kimsey de Philadelphia, Pennsylvania comercializó un envase de cartón cónico sanitario con un baño de cera interior con propiedades impermeables que permitía el transporte de leche en su interior. Otras patentes más tarde surgieron en forma rectangular como la patente de J. Van Wormer en 1910.
- 1937** A pesar de que la silla de cartón parezca algo que pertenezca a mediados de siglo , ya antes en 1937 se patentó la primera silla plegable hecha de cartón por A.W Rowe, no sólo para usarla como silla sino que también como inodoro auxiliar. El 1965 se mejoró esta silla plegable de cartón por T.J.Lyles.
- 1952** Charles y Ray Eames comercializaron su juego para niños, "House of cards", en el que se podían componer estructuras con cartas de papel plastificadas.
- 1968** Peter Raake diseña la silla Otto compuesta por cartón.
- 1972** Se da a conocer y se acepta mundialmente la posibilidad de poseer mobiliario hecho en cartón, con la colección en Easy Edges, de Frank O. Gehry, especialmente su silla "wiggle chair" hecha en cartón, aportando no sólo funcionalidad, sino también diseño.
- 1976** Chiel van der Stelt, Hans Mesman y Wim Kahmann, como proyecto de graduación, construyen una casa temporal con estructura de cartón corrugado plegado. La Casa podía ser transportada, estando las piezas plegadas, en una dimensión máxima de 3x1,8x3 metros, pesando 200 kg. Su cimentación se componía por piezas de aluminio para proteger al cartón de humedades.
- 1986** Shigeru Ban usa por primera vez tubos de cartón de pequeña escala para la exposición de Alvar Aalto en Tokyo.
- 1989** Primer edificio construido en tubos de cartón, "Paper Arbor" en Aichi Japón diseñado por Shigeru Ban.
- 1994** Casa en tubos de papel, Paper House, paper tube structure 05, en Yamashi, Japón, diseñado por Shigeru Ban.
- 1994** Estudio para un artista Miyake Design studio Gallery. Paper tube structure 06, en Shibuya, Japón, diseñador por Shigeru Ban
- 1995** Paper Church-Kobe; Iglesia Takatori Kyokai hecha en cartón diseñada por Shigeru Ban, Kobe, Japón.
- 1996** Artista e investigador de pulpa de papel Peter Gentenaar, experimenta con pulpa y los secados y sus mezcla con fibras más rígidas, hasta conseguir texturas de papel bien esculpidas.
- 1998** Bóveda de Cartón, diseñada por Shigeru Ban en Masuda, Gifu, Japón.
- 1999** Construcción de un museo infantil, "Nemunoki's Art Museum" en Shizuoka Japón, diseñado por Shigeru Ban.
- 2000** Paper Arch,; Arco de papel, formado por tubos de cartón dispuestos en una malla tridimensional expuesto al exterior, en el museo de arte moderno de Nueva York. Shigeru Ban
- 2000** Expo de Hannover, Alemania Pabellón de Japón compuesto por una malla tridimensional de tubos de cartón, diseñado por Shigeru Ban y Frei Otto.

- 2001** *Westborough school, La primera escuela primaria hecha en cartón, diseñada por Cottrell and Vermeulen y con ayuda de un ingeniero que colabora con Shigeru Ban, Buro Happold, localizado en Westcliff on sea, Inglaterra.*
- 2002** *Taco Van Iersel, presenta como proyecto de fin de carrera, una pared construida a partir de cajas de cartón ensambladas con unas pestañas para conseguir mayor rigidez.*
- 2002** *Monique Verhoef Presenta su proyecto de fin de carrera un proyecto en cartón. Bóveda formada por geometría triangulada formando pliegues que rigidizan la estructura.*
- 2003** *Blobboard, proyecto de concurso, para una biblioteca, creado por Pim Marsman y Jop Van Buchem, proponen una cápsula de doble piel creado a partir de cajas de huevos, mojándolas para moldearlas y posteriormente dejar secar en la forma deseada.*
- 2003** *Proyecto de fin de carrera de Henk van Dijke, utilizando cartón mezclado con agua, se obtiene pulpa, a partir de la cual Henk moldea unos paraguas, que ensamblados forman un toldo o porche.*
- 2004** *Maria de Boon propone tabiques interiores hechos en cartón alveolar, pudiendo ser sustitutivos a los tabiques comunes de subestructura metálica y Pladur.*
- 2004** *Julia Schönwälder presenta investigación sobre el comportamiento mecánico del cartón a largo plazo, analizando elementos constructivos fabricados en cartón como por ejemplo vigas, llevando a cabo prototipos en laboratorios estudiando todos los parámetros.*
- 2004** *Paper parasite, es un proyecto en el que se utilizan una sección oval de cartón decreciente en tamaño conforme nos acercamos a los extremos, formando en su conjunto una casa en forma de óvalo. Este proyecto intenta dar respuesta a la demanda actual de sociedad consumidora compulsiva, donde la casa es un objeto de expresión de individualidad.*
- 2005 /2006/2007/2011** *Nomadic Museum, New York, Los Angeles, Tokyo; Estructura de tubos de papel y contenedores, trasladados de una ciudad a otra, arquitecto Shigeru Ban e Ingeniero, Buro Happold.*
- 2005** *Stutchbury & Pape presentaron para la exhibición "Houses of the future" en Sydney Australia una casa hecha de marcos de cartón dispuestos repetidamente en línea, encajándose como las cavidades dentro de las cajas de botellas. Estos marcos podían ser transportados fácilmente necesitando sólo dos personas y 6 horas para ensamblarlos.*
- 2005** *Taco Van Iersel Propone bandejas de instalaciones hechas en cartón, evitando el uso excesivo de bandejas metálicas más complejas.*
- 2006** *Se construye un pabellón hecho de cartón alveolar, en la facultad de arquitectura de TUDelft "Card Board Pavilion"*
- 2009** *Paper Tower, London, Shigeru Ban. Estructura de tubos de cartón formando un cono. Uniones con piezas metálica estrelladas*
- 2011** *El artista Zimoun junto con el arquitecto Hannes Zweifel, presentan en una de las colecciones de Zimoun una estructura hecha con láminas de cartón, aparentemente puestas de manera aleatoria.*
- 2011** *Paper Atelier, Miyagi, Onagawa, Japón, Shigeru Ban. Estructura de Tubos Papel, con Policarbonato de fachada para permitir entrada de Luz y proteger a la estructura de cartón.*
- 2013** *En 2013 Zimoun vuelve a experimentar con el cartón y esta vez apilando cajas unas sobre otras de manera curva desfasando la línea de cajas inferior con la superior y otro proyecto en el que apila las cajas literalmente una sobre otra.*

2013 Cardboard Cathedral, Shigeru Ban, New Zealand. Iglesia construida en sustitución de una iglesia anterior destruida por un terremoto. Ban utiliza tubos de cartón de gran dimensión.

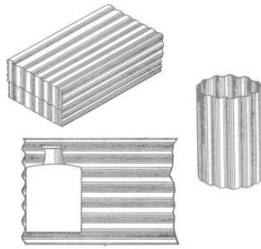
Como puede apreciarse, el papel, y su derivado, el cartón, han sufrido innovaciones a medida que han ido apareciendo diferentes necesidades a lo largo de la historia, y que la tecnología ha apuntado a la posibilidad de satisfacerlas. Desde su condición original de papiro, el papel pronto pasó a formar parte de la arquitectura como elemento, ligero, separando y creando distintos ambientes interiores. Más adelante, el cartón, compuesto por capas de papel encoladas, sirvió como continente empaquetando de objetos cada vez de mayor escala, aumentando sus capacidades mecánicas. Aprovechando estas propiedades, aparecieron mobiliarios de cartón dentro de espacios interiores, y de ahí terminó conteniendo este mobiliario, siendo el cartón continente y a su vez el contenido.

El papel como cartón ha desempeñado hasta hoy su función como material resistente para empaquetar y proteger objetos y ha ido evolucionando acorde a esta función a desempeñar. En las últimas décadas el cartón se ha sacado de su contexto llevándolo a nuevos campos, utilizando la resistencia máxima que ha sido alcanzada, la cual sería apropiada de investigar para estos nuevos usos. Se plantean actualmente estructuras con el cartón que hasta hoy aún no ha sido “patentado” o “competitivo” dentro de la industria de la construcción de estructuras en edificios, en comparación con el hormigón o el metal.

Para poder comparar y poder hacer críticas del papel como material ante otros materiales como el hormigón y el metal, es necesario entender de qué está compuesto el cartón y cómo funciona ante diferentes agentes.

INNOVACIONES SOBRE EL CARTÓN

Cartón corrugado **1871**
Innovación: **Resistencia**



1

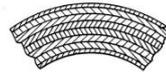
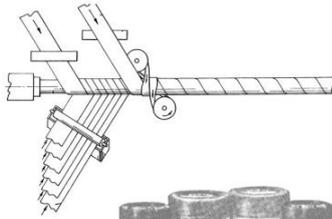
Cartón corrugado entre dos láminas **1874**
Innovación: **Estabilizar ondulaciones**



2

Cilindros de cartón con exterior de cera para reproducir música desde el gramófono.
Innovación:

Cambio de geometría + mezcla de materiales **1889**



3



4

Caja de cartón marcada y precortada **1890**
Innovación: **Producción**



5

Uso de caja de cartón para envasar alimentos **1900**
Innovación: **Industria de la alimentación**



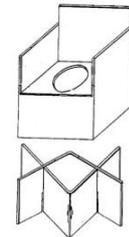
6

Envase de cartón + Lámina impermeabilizante interior **1904**



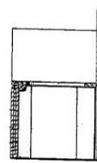
7

Caja de cartón Sanitaria para líquidos **1910**
Innovación: **Transporte de líquidos**



8

Caja de cartón sacada de su contexto, ofrece otra función. **1937**
Innovación: **Cambio de función de continente a estructural**



Actualidad:
Cartón para encofrar columnas en obra.
Cartón para Mobiliario particular
Cartón para edificios ?

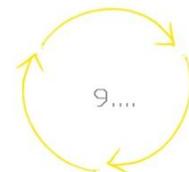


Figura 5. Innovaciones sobre el cartón en sus orígenes.

4. EL PAPEL Y SUS DERIVADOS COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN.

4.1 Procedencia y composición del papel

Papel es de lo que está compuesto (principalmente) el cartón, y lo que compone al papel es la pulpa (fibras). Antiguamente los chinos ya fabricaban papel a partir de los residuos de la seda, la paja de arroz, y el cáñamo, e incluso del algodón. La pulpa puede componerse de fibras recicladas o de fibras de madera de coníferas o bosque tropical; que a través de procesos mecánicos y químicos, llegan a formar una pasta que posteriormente será presionada y secada para conseguir una lámina de papel. La calidad, la resistencia y el coste del papel suele ser variada según el origen del que proceda la pulpa, no siendo casual que en la portada de *Pulp Fiction* esté escrito "10 cents"; el papel de pulpa reciclada de restos maderas y trapos marcó una época, (retomando ya lo que se hacía en la Edad Media, que era producir papel de menor calidad a partir de camisas y trapos viejos lo que hizo posible el papel asequible y accesible).

4.1.1 Fibras: Estructura del papel

El papel está compuesto de fibras de origen vegetal y cuyo factor de resistencia se mide por el grado de cohesión de estas. La red fibrosa así constituida contiene gran cantidad de aire, por ello es poroso, lo que lo diferencia, entre otras cosas, de los plásticos.

Existen dos tipos de fibras:

- Las fibras "largas" de maderas resinosas de coníferas (pino, abeto, etc.). Largo = 3 a 4,4 mm, ancho = 0,02 a 0,05 mm.
- Las fibras "cortas" de madera de frondosas (abedul, chopo, haya, eucalipto, etc.). Largo = de 0,8 a 1,5 mm, ancho = 0,01 a 0,02 mm.

La cohesión de esta red de fibras se obtiene a través de la unión de las fibras entre sí, de varias maneras:

- Natural: La unión físico-química se consigue con el agua mediante los puentes de hidrógeno, que actúan como imanes.
- Artificial: Añadiendo productos que mejoran la unión.

Estas fibras forman una pasta que puede denominarse:

- Pasta de papel: sacada directamente de la madera u otra materia prima.
- Pasta de recuperación: papel que vuelve a emplearse como materia prima, después de haber cumplido sus funciones.

Propiedades de la fibra:

-Hidrófila: tiene gran capacidad de absorción de agua.

-Plana y rígida cuando está seca.

-Blanda e hinchada cuando está húmeda o en agua.

-La fibra absorbe y retiene de dos a tres veces su propio peso en agua.

Una hoja seca ofrece una buena resistencia y cohesión. La misma hoja remojada en agua pierde su resistencia mecánica. La misma hoja seca, remojada en agua y vuelta a secar, prácticamente recupera toda su resistencia y cohesión. Un papel fabricado “en seco” es decir, sin agua ni ningún producto de unión carece de resistencia mecánica. Sin el agua es imposible garantizar la unión de las fibras, por ello es necesario someter a las fibras a procesos como:

-Refino hidratante: Al mojar la fibra la pared secundaria se destruye a consecuencia del hinchamiento por agua.

-Desfibrado y Refino cortante: Acción mecánica que hace que las fibrillas de la capa secundaria quedan libres.

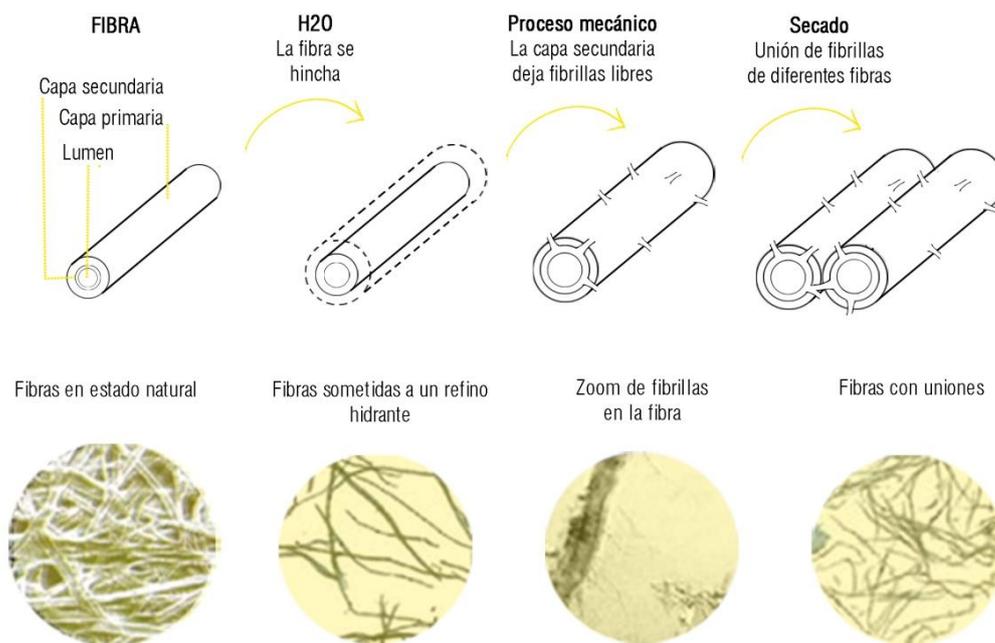


Figura 6. Proceso de hinchamiento de fibra en el papel

El papel es un material: Heterogéneo: Se aprecian varias partes que componen su sistema; Anisótropo: la temperatura, conductividad, elasticidad... depende de en qué dirección (x,y) se estudie el material; No lineal- visco-elástico: el módulo de Young no es constante; e Higroscópico; humedad del material en relación a la humedad relativa del ambiente.

El cartón es una estructura ligera pero de alta resistencia obtenida de la unión, de varias hojas de papel, mediante una cola de almidón. Todo ello hace que la estructura del cartón dependa directamente de las características del papel.

4.2 Características físicas.

_El sentido de fabricación del papel longitudinal y transversal aportará al papel las siguientes propiedades mecánicas:

-La rigidez y resistencia en el sentido longitudinal son de 1,5 a 2 veces superiores a las del sentido transversal. Por ello, en el caso del cartón corrugado, la ondulación del papel se hace en el sentido longitudinal (MD, Machine Direction) y no en el transversal (CD, Machine Cross Direction) ya que resiste altas tensiones y se deforma menos.

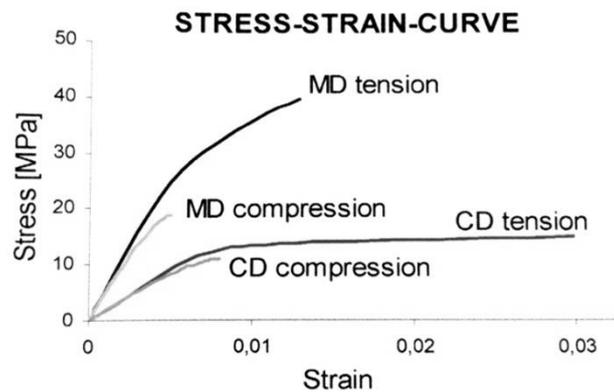


Figura 7. Curvas tensión-deformada de una lámina de cartón.
Tesis doctoral Julia Schönwälder

-El alargamiento y la resistencia al desgarro en sentido longitudinal son inferiores a los del sentido transversal.

_Gramaje: Designa la cantidad de masa de papel que hay por unidad de superficie. El gramaje se expresa en gramos por m². Es una característica imprescindible ya que el papel se vende al peso. Por regla general, las propiedades mecánicas aumentan con el gramaje. Las propiedades mecánicas más importantes del papel para corrugar son:

-La resistencia al aplastamiento en plano

-Las resistencias a la compresión sobre el canto del papel; por ejemplo, sobre el canto de un tubo de cartón.

-La resistencia a la tracción y al alargamiento.

-La resistencia a la compresión en corto, es decir, la resistencia a la compresión en la dirección transversal del papel medida entre dos mordazas separadas por una distancia de 0,7mm. Esta corta distancia permite suprimir la influencia de

la deformación de la muestra, y tener sólo en cuenta las características de las fibras y los enlaces o uniones relacionadas entre ellas.

_Espesor (grosor o calibre): Este interviene en la determinación del volumen específico que tendrá el papel; esta se define como la relación que hay entre el espesor y el gramaje, expresándose en cm³ por gramo. A un gramaje constante, un papel de mayor espesor tendrá un volumen específico superior.

_Humedad: Expresada en %, por la relación que hay entre la cantidad de agua que contiene el papel y su peso. La celulosa hace al cartón ser un material Higroscópico, es decir, que la cantidad de humedad que contiene el cartón depende de la humedad relativa del ambiente y la temperatura. Todo cambio de equilibrio de humedad entre la atmósfera y el papel produce:

-Cambios dimensionales, superiores en el sentido transversal que en el longitudinal; las fibras se hinchan aumentando su sección.

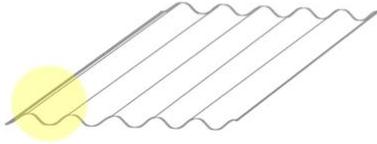
- Variaciones de las propiedades mecánicas, ya que las uniones entre las fibras se debilitan.

- La formación de ciertos defectos, tales como pliegues y arrugas.

El cartón contiene fibras de madera las cuales se hinchan con agua para responder en su medio natural a varios propósitos en el proceso de la pudrición. Hongos e insectos requieren de muchos procesos metabólicos. Los hongos, también proporcionan un medio de difusión para que las enzimas degraden la estructura de las fibras. La micro-estructura de la madera se hincha hasta alcanzar el punto de saturación de la fibra. En este punto, en el agua libre en las cavidades de las células de la madera, el hongo puede comenzar a degradarla. La hinchazón asociada con el agua se cree que hace a la celulosa más accesible a las enzimas de los hongos, aumentando la velocidad de pudrición del material. Por ello son importantes los previos tratamientos de las fibras de madera, para la producción de sus derivados, con procesos y productos artificiales para así evitar en la mayor manera posible el proceso de pudrición. La aplicación de barnices sobre la superficie exterior de la madera o sus derivados como papel o cartón ayuda a la protección química y física del material ante agentes externos.

CARTÓN CORRUGADO

La ondulación del cartón corrugado sigue la dirección longitudinal de la fibra



La posibilidad de variar la amplitud de onda de la lámina ondulada y la adhesión de las láminas exteriores llamadas "liners" hacen variar sus propiedades resistentes para sus diferentes aplicaciones.

Tipo de onda E

1.0 a 1.8mm

Tipo de onda B

2.1 a 3.0 mm

Tipo de onda C

3.2 a 3.9mm

Tipo de onda E+C

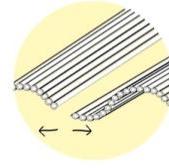
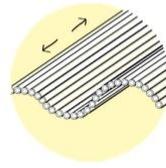
2.1 a 3.0 mm
3.2 a 3.9 mm

—
+
Espesor proporcional a la amplitud de onda

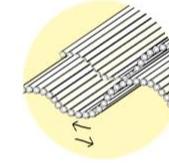
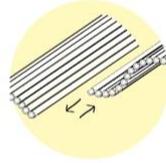
Combinación de amplitudes anteriores

dirección
Longitudinal
fibra

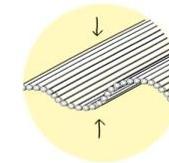
dirección
Transversal
fibra



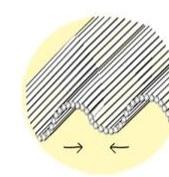
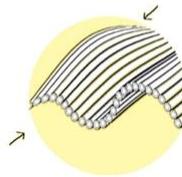
Tracción



Desgarro



Compresión sobre el plano (Aplastamiento)



Compresión (en Corto)

Figura 8. Propiedades físicas del cartón corrugado

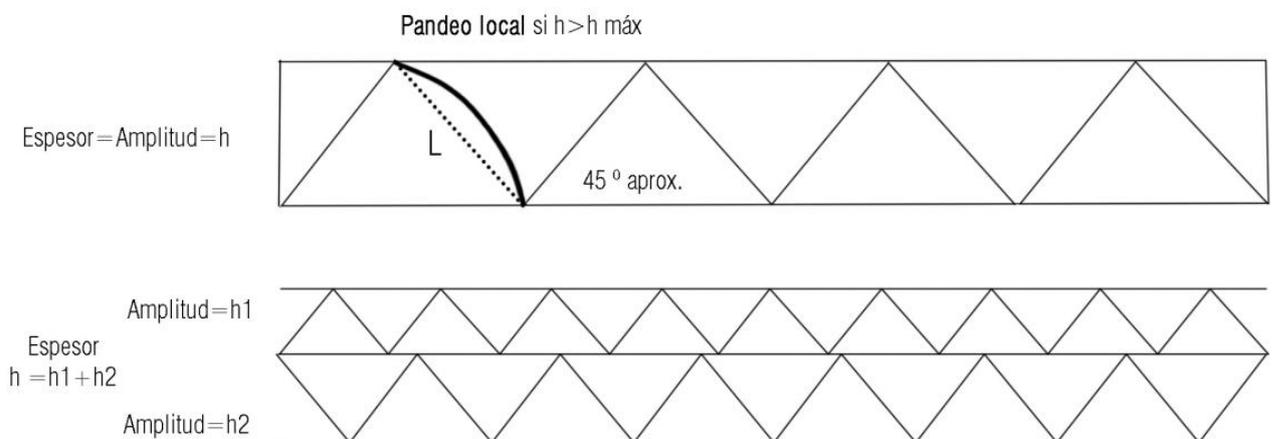


Figura 9. Analogía de viga celosía en cartón corrugado

_Permeabilidad a los líquidos: Capacidad que tiene el papel de absorber un líquido, en general el agua es alta ya que es un material muy poroso.

_Permeabilidad al aire: Teóricamente se mide por el volumen de aire que atraviesa, en un segundo, 1 cm² de papel bajo la fuerza de depresión de 1cm de agua. Por consiguiente, dicho volumen define la porosidad del papel. Debido a la porosidad de los papeles componentes, el cartón corrugado “es poroso” y facilita de esta manera el intercambio de aire entre el interior del embalaje y la atmósfera en la que se encuentra.

4.3 El papel como elemento constructivo y estructural

Se estudiarán desde la estructura del cartón en sí, atendiendo a sus diferentes estandarizaciones en la industria; cartón corrugado, cartón alveolar y tubos de cartón, hasta las estructuras formadas por estos estándares.

4.3.1 Láminas de cartón sólido y láminas de cartón corrugado

La industria ha desarrollado e investigado insistentemente acerca de las propiedades del cartón corrugado, ya que es el más antiguo y al que se le ha dado más utilidad para empaquetados, cajas etc... La variedad de los cartones viene dada por el diferente acabado que pueda tener y su resistencia según su finalidad de uso.

El cartón corrugado se compone de “liners” láminas exteriores de cartón sólido y una lámina ondulada interior haciendo que el cartón adquiera más inercia utilizando menos papel. Es posible ir aumentando el espesor de la lámina de cartón aumentando la amplitud de la onda. La inclinación de la onda debería ser alrededor de 45º ya que así trabaja mejor.

Existe un límite de amplitud; hay una estandarización del tipo de onda (figura 8) ya que si se supera el máximo de amplitud aparece pandeo local en la onda, haciendo fallar la estructura. La solución a la necesidad de un mayor espesor y evitar pandeo local es combinar ondas de menor espesor, uniéndolas entre sí encolando sus láminas exteriores de cartón (liners). Para entender mejor su funcionamiento se podría hacer una analogía con una viga en celosía (figura 9)

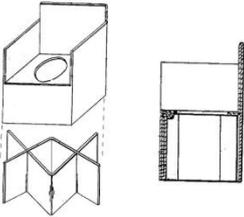
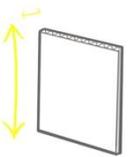
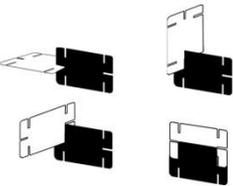
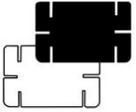
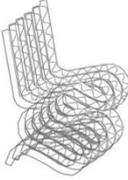
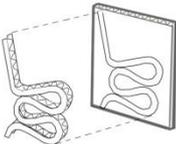
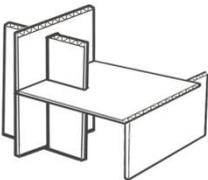
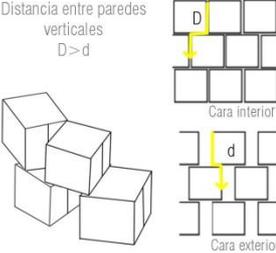
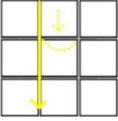
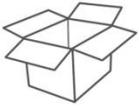
Proyecto	Ensamblaje	Escala proyecto	Elemento constructivo	
Silla plegable / Inodoro A.W Rowe_1937		M	 <p data-bbox="1166 389 1284 450">Amplitud de onda NO proporcional a su esbeltez.</p>	
"House of cards" Charles and Ray Eames_1952		S		
Wiggle chair. Colección "Easy edges" Frank Gehry_1972			M	
Zimoun + Hannes Zweifel_2011			L	
Zimoun_2013		<p data-bbox="703 1429 852 1491">Distancia entre paredes verticales $D > d$</p>  <p data-bbox="900 1532 979 1554">Cara interior</p> <p data-bbox="900 1666 979 1688">Cara exterior</p>	L	
Zimoun_2013			L	

Figura 10. [10.1] *Fodable seat*, A.W. Rowe, 1937. [10.2] *House of cards*, Eames, Charles & Ray, 1952. [10.3] *Wiggle chair, Easy edge*; Gehry, Frank, 1972 [10.4] *Zimoun + Hannes Zweifel exhibition*, 2011. [10.5] *Zimoun exhibition*, 2012. [10.6] *Zimoun exhibition*, 2013.

El cartón más cotidiano, láminas de cartón, cajas de cartón... al estar a la mano de todo el mundo ha hecho posible que niños, artistas, gente cotidiana... investiguen con el material, llegando a apilar y ensamblar cartón de múltiples maneras:

La figura 10.1 muestra la primera silla/inodoro en cartón patentada. Consiste en una carcasa exterior compuesta por láminas de cartón perpendiculares entre sí, con refuerzo en las uniones en ángulo recto. Para aportar mayor estabilidad se colocan rigidizadores en diagonal interiores, dejando un hueco interior para las necesidades.

Disposición de cartas de papel plastificado en la figura 10.2 no es aleatoria ya que las ranuras establecen un orden de ensamblaje, el mínimo espesor de la carta hace que sea flexible y al estar plastificado aumenta la resistencia. Las láminas de cartón son poco estables dispuestas verticalmente tendiendo a volcar. Necesitan más masa en sentido perpendicular al plano por ello para poder conseguir más estabilidad y resistencia una vez superado el límite de espesor (límite de amplitud de la onda) se multiplican las capas de cartón con una amplitud adecuada, encolando una junto a otra, actuando todas las capas como una misma pieza aumentando significativamente la resistencia y estabilidad del material como ocurre con la silla "wigggle chair"(figura 10.3). Se utilizan piezas recortadas geométricamente idénticas de paneles de cartón corrugado, encoladas una detrás de otra.

2000 láminas de cartón corrugado de 70 x70 cm ensambladas aleatoriamente, han sido utilizadas para una de las exposiciones de Zimoun (figura 10.4). El comportamiento de la estructura es difícil de controlar ya que al parecer se disponen de manera aleatoria. Se gana estabilidad utilizando la ondulación de las láminas de cartón en la buena dirección. Zimoun vuelve a utilizar el cartón (figura 10.5), esta vez 186 cajas de cartón corrugado de 60 x 60 x 60 cm, apiladas disponiendo un círculo. El vacío que aparece entre las cajas en la cara exterior hace que la estructura trabaje diferente que en la cara interior; las paredes laterales verticales están casi una debajo de otra transmitiendo de manera más optimizada las cargas de piso a piso. Si apilamos las cajas una debajo de otra sin desfase, hace que la estructura sea más estable, ya que las paredes laterales están puestas una debajo de otra. En la figura 10.6 se muestra el proyecto de 318 cajas de cartón apiladas una debajo de la otra, aunque esta disposición sería un problema si las cajas contuviesen algo en su interior, habiendo cargas justo en el centro del plano horizontal sin apoyos pudiendo aparecer deformación local.

Los ejemplos anteriores aunque si sean objeto de investigación son sólo estructuras temporales donde realmente no existe un estudio previo de lo que sería un elemento constructivo. Verdaderamente la buena función y actuación de tabiques dependen de las propiedades del cartón, medidas y puestas a prueba, para llegar a ser verdaderamente competitivo frente a otros elementos de partición interior dentro de la industria donde se requieren especificaciones técnicas las cuales son de debido cumplimiento: 1. Legislación y normativa: Aislamiento térmico, acústico, durabilidad, ecológico... ; 2.Demanda de usuarios: Manejabilidad, montaje, desmontaje, transporte, adaptabilidad...; 3.Factores económicos: Mercado relacionado con la demanda de usuarios y la legislación.

Existen proyectos donde sí se han desarrollado propiamente elementos constructivos interiores destinados a cumplir dichas especificaciones.

Proyecto	Ensamblaje	Escala proyecto	Elementos constructivos
Caso de estudio-1, TUDelft: Sistema interior de pared hueca. Taco-dozen		M	<p>Lámina interior de aluminio usada para envases de cartón para líquidos</p> <p>Lámina exterior de cartón</p> <p>Subestructura de madera</p>
Caso de estudio-2, TUDelft: Sistema para interior de pared apilable. Stucloper	<p>Diagrama de resistencia a compresión</p>	M	<p>Refuerzo con solapas donde tiene menos resistencia</p>
Proyecto 4.6.3. TU-Delft: Soportes para instalaciones de cables. Taco van Iersel		S	
Prototipo Viga-1: TUDelft, pruebas en laboratorio	<p>Sección</p> <p>Alzado</p> <p>F</p> <p>Se somete a la viga a dos cargas puntuales simétricas</p> <p>Pandeo local en los puntos de transmisión de carga.</p>	L	
Prototipo Viga-2: TUDelft, pruebas en laboratorio	<p>Sección</p> <p>Alzado</p> <p>Planta</p> <p>No sufre pandeo local, debido a la geometría dentada y aumento de grosor del ala superior</p>	L	<p>Ala sup. 12 capas de cartón</p> <p>Ala inf. 8 capas de cartón</p> <p>Almas 5 capas de cartón</p>

Figura 11. [11.1] Caso de estudio-1TUDelft, Taco-Dozen. [11.2] Caso de estudio-2 TUDelft, Taco van Iersel. [11.3] Soporte para cableados eléctricos. Proyecto 4.5.3 TUDelft, Taco Van Iersel. [10.4] Prototipo Viga-1 TuDelft, Julia Schönwälder [10.5] Prototipo Viga-2 TUDelft. Julia Schönwälder.

Las dos soluciones que se pueden ver en la figura 11 (11.1 y 11.2), fueron estudiadas para ver si era posible su desarrollo y comercialización, por la universidad TUDelft.

El caso de estudio-1, un tabique interior compuesto por dos paredes de cartón sobre una subestructura de madera con una cámara de aire de 2 cm entre ellas, que junto con una lámina de aluminio interior refleja calor radiante contribuyendo al equilibrio térmico, podría reemplazar a la lana de vidrio por sus propiedades aislantes; pero la gran desventaja sería la manera de ensamblar; el uso de grapas y adhesivo hace que aumente el tiempo para el correcto secado del adhesivo y el uso posterior de varias capas de papel para que la capa exterior fuese lo suficientemente resistente, aumenta el peso de la pared complicando aun más la labor, resultando inviable en la industria en comparación con la rapidez de ensamblaje de las subestructuras metálicas comunes, con sus respectivos paneles de Pladur.

El caso de estudio-2, tiene una semejanza al sistema de masonería tradicional, aunque con la ventaja de que el cartón es mucho más ligero que un ladrillo. Normalmente cuando se apilan cajas, la carga de la caja superior la toma la caja inferior desde punto medio de la caja, donde la resistencia a compresión es menor. Y por otro lado necesitan una unión entre ellas para la transmisión continua de cargas de caja a caja. La solución propuesta son las pestañas laterales de la caja, deslizándolas y encolándolas entre cajas para conseguir que resista la compresión en el punto medio de la caja. El inconveniente de este sistema es la aplicación de adhesivo que prolonga el montaje de las piezas, ya que hay que esperar a su secado. Habría que mejorar el sistema, pudiendo ser un montaje en seco, siendo así competitivo dentro de la industria.

Aparte de tabiques interiores se han desarrollado bandejas para las instalaciones (figura 11.3), que ocupan normalmente un considerable espacio dentro de los edificios. La posibilidad de crear conductos soporte en cartón para cableados supone ventajas como: bajo coste, posibilidad de reciclaje, facilidad de transporte y facilidad de montaje en comparación con las cajas de cables convencionales. El sistema está compuesto por láminas de cartón corrugado plegadas para obtener cierta rigidez en dirección perpendicular al plano.

El desarrollo de sistemas constructivos donde láminas de cartón o cartón corrugado son usados como forjado, salvando ciertas luces, son escasos, aunque sí se han realizado pruebas en laboratorio donde se puede ver el comportamiento resistente del cartón cuando toma geometría idónea para salvar luces, como la típica sección en "I" de vigas convencionales.

En el caso de la figura 10.4, el perfil es de doble "I", 25x30 cm, compuesto por varias láminas de cartón sólido encoladas entre sí con adhesivo para madera para formar las alas y el alma de la viga. Su interior está reforzado con una tira en Zigzag, para evitar el pandeo de la sección a lo largo de la viga. Esta, soportó 6000N. La parte superior mostró deformación local a consecuencia de la discontinuidad de las láminas de papel a la hora de manufacturar el cartón para las alas de la viga. Debido a esta falta de continuidad de las láminas encoladas, estas trabajaron como láminas independientes causando la deformación.

Se mejoró la viga anterior (figura 10.5), siendo ahora un perfil de doble "I", 30x15 cm, con mayor esbeltez que la anterior y mayor grosor del ala superior (12 capas de cartón

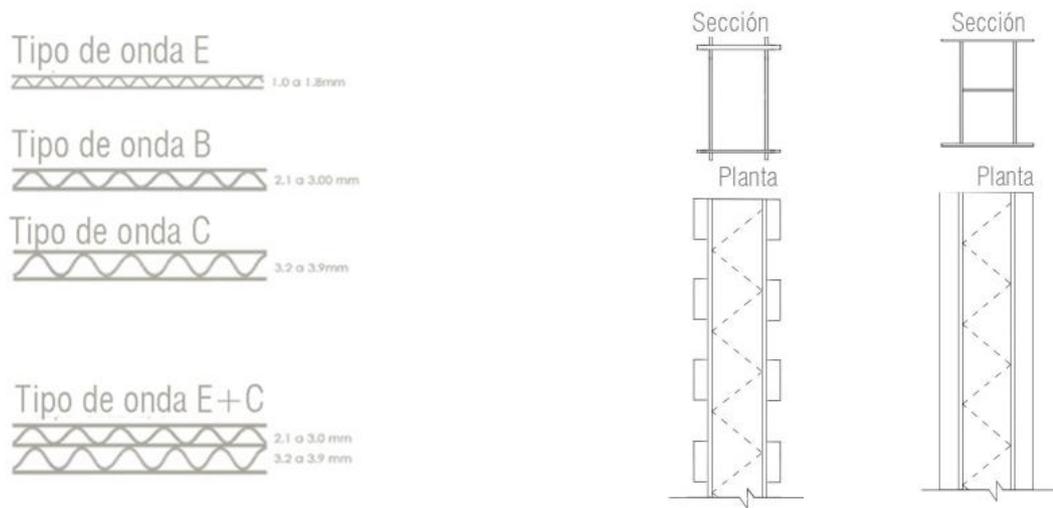


Figura 12 [12.1] Tipos de onda de cartón corrugado estandarizados. [12.2] Referencia a la figura anterior 11.4. [12.3] Referencia a la figura anterior 11.5.



Figura 13 Vivienda temporal, proyecto de graduación Chiel van Stelt, Hans Mesman y Wim Kahmann, 1976, pg 33 del libro *Cardboard in Architecture*, M. Eekhout, IOS Press, 2008

sólido) en comparación con el ala inferior (8 capas de cartón sólido). El alma y la cinta interior en Zigzag tienen el mismo grosor, ambas compuestas por 5 capas de cartón. A diferencia de ejemplo anterior (figura 10.4). Sólo se usó adhesivo de madera para la cinta interior, el resto de piezas fueron encajadas entre sí con bordes dentados. La viga soportó mayor esfuerzo llegando a 10000N fallando por compresión pura en el centro de la viga y más tarde, apareció pandeo en este mismo punto, una vez superado su resistencia máxima. La proporción entre carga y esbeltez se podría modificar para optimizar aún más esta viga.

Es interesante observar que en las vigas anteriores la manera de disponer los planos de cartón, en concreto el alma compuesta por la cinta en zigzag entre dos planos siguen el mismo patrón que el cartón corrugado (lámina interior ondulada y “liners” a los lados). La geometría utilizada en una escala mínima, podría ser aplicada también en una escala mayor, utilizando la pieza de inferior escala creada con esa geometría como la unidad mínima para construir otra vez la misma geometría en una escala mayor.

Aunque aparezca que no se haya llegado a la escala XL con cartón corrugado, si que existe un caso, siendo de hecho, el primer prototipo de casa diseñada y construida en cartón, creada por Chiel Van der Stelt, Hans Mesman y Wim Kahmann, presentándolo como proyecto de graduación en 1976 (figura 13). Consiste en un sistema de plegado de piezas de cartón corrugado encajados y unidos con adhesivo y materiales sintéticos o con nexos de unión de chapa metálica. La casa se transportaba plegada en piezas de 3 x 1,8 x 3 metros, pesando unos 200 kg.

El sistema estructural basado en el pliegue de los planos de cartón aporta mayor resistencia y estabilidad al material. La cimentación se resolvió con pletinas metálicas, para proteger al material de la humedad. La estanqueidad de todo el conjunto de piezas era uno de los aspectos más importante para poder patentar este sistema: se utilizó láminas de aluminio para proteger la cubierta, se recubrió la parte exterior con una capa blanca y por el interior con una capa transparente. La geometría de la cubierta la hace vulnerable al viento, por ello se optó por agarrar mediante cuerdas, los extremos de la cubierta, a la cimentación metálica.

A pesar de las soluciones propuestas en este proyecto, aún existía una complicación en las uniones entre piezas, y su posible estanqueidad, ya que al fin y al cabo la estructura de cartón se vería afectada por los agentes externos perdiendo resistencia y por tanto funcionalidad estructural y portante. Por ello, estos aspectos más tarde se solucionaron de manera más eficiente utilizando otro tipo de geometría de cartón (geometría tubular), que veremos más adelante en los trabajos realizados por Shigeru Ban con tubos de cartón.

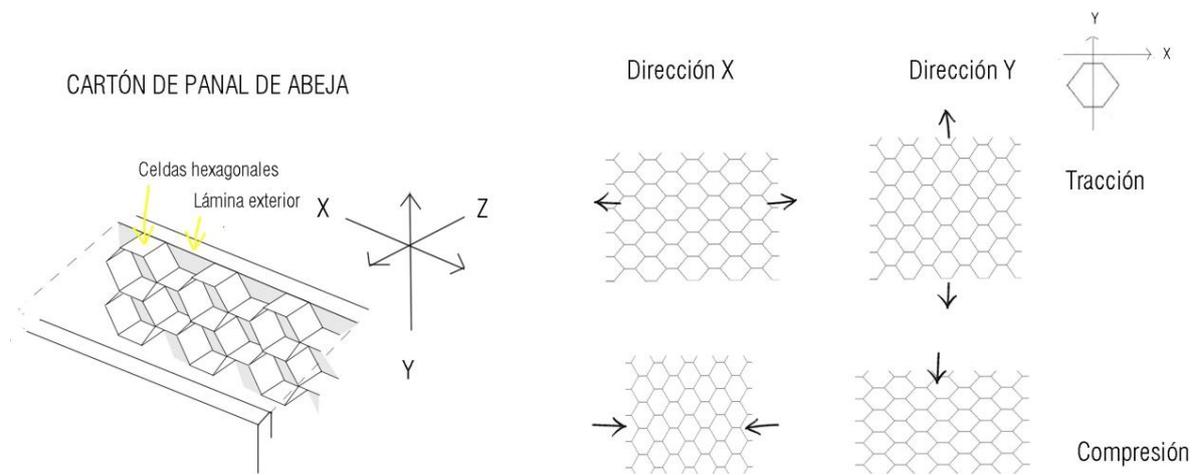


Figura 15. Propiedades del cartón alveolar hexagonal.

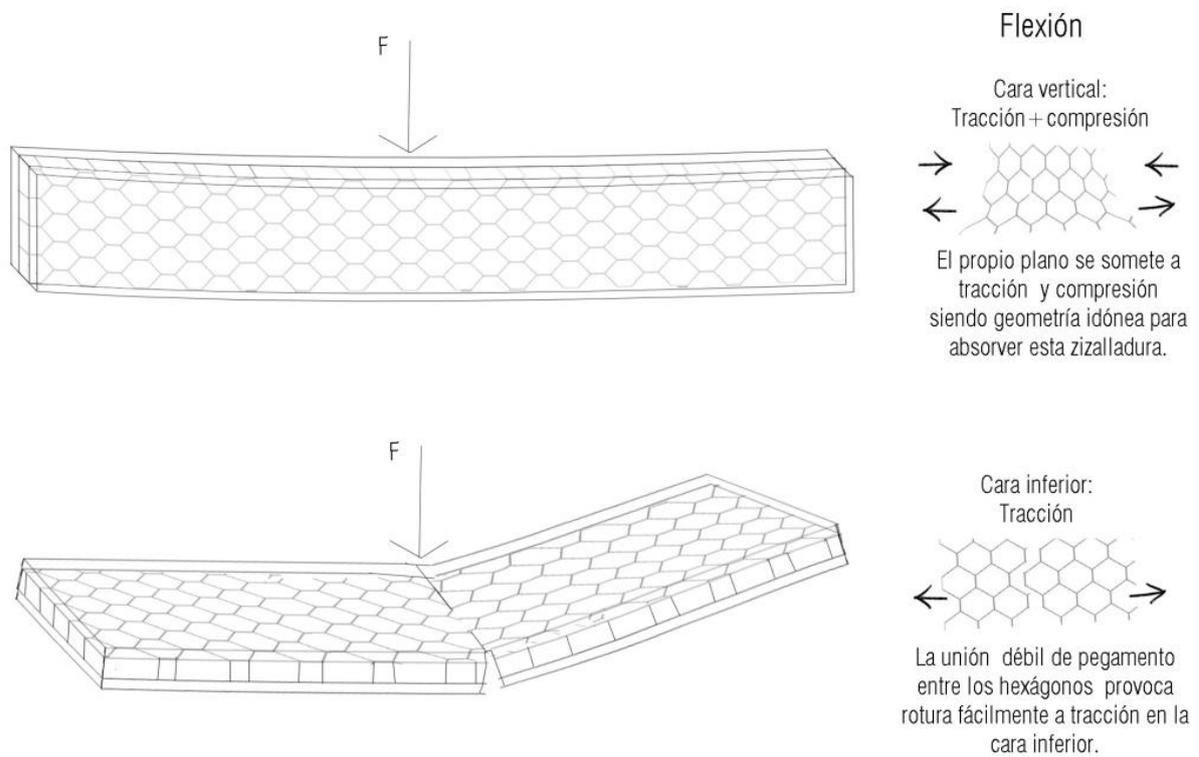


Figura 14. Paneles de cartón alveolar sometidos a flexión.

4.3.2 Cartón alveolar hexagonal

El cartón alveolar se manufactura utilizando cintas de papel posterior mente encoladas entre sí formando celdas entre ellas de geometría hexagonal ó también moldeando y secando la pulpa directamente en un molde obteniendo la forma hexagonal. Esta malla se protege entre dos láminas de cartón sólido.

Al ser una geometría más compleja, la resistencia en una dirección u otra puede variar notablemente según al esfuerzo al que esté sometida.

Según estudios realizados por el profesor Minoru Tezuka³³, la malla trabaja mejor a compresión en dirección Y que en dirección X, siendo de manera inversa a tracción (figura 14). No obstante el módulo de Young es casi constante en la dirección Y, tanto a tracción como a compresión, variando este en la dirección X. Por ello cuando sometemos a flexión una placa de cartón alveolar en disposición vertical, la malla hexagonal trabaja mejor si su dirección local Y es perpendicular (en el mismo plano) a la dirección de la fuerza que provoca la flexión.

Este cartón alveolar al contrario que un cartón corrugado, puede una sola lámina adquirir más grosor debido a su geometría, teniendo un límite de espesor mayor. La desventaja es que al someter el panel a una fuerza en dirección perpendicular al plano, la malla hexagonal antes de sufrir pandeo local, puede sufrir rotura frágil (rotura sin previa deformación) debido a la tracción en la cara inferior que separa las cintas encoladas que forman las celdas hexagonales (figura 15).

En el proyecto del museo de arte infantil de Nemunoki (figura 16.1), Shigeru Ban utiliza placas alveolares, pero en vez de manufacturar la malla alveolar hexagonal y posteriormente encolar las dos láminas exteriores a la malla, se manufacturan de una vez la malla junto con una de las láminas exteriores de una sola pieza, formando un panel encajando dos de estas piezas, obteniendo una pieza de cartón alveolar mucho más resistente que la convencional.

Las placas se disponen en sentido vertical ya que son mucho más resistentes, que en sentido horizontal, teniendo mayor inercia. Las uniones entre cada material son diferentes, no es lo mismo unir cartón con madera, que madera con madera, que cartón con cartón.

Es fundamental el análisis de las uniones ya que transmiten las cargas entre materiales de diferente resistencia, no sólo atendiendo a la distancia y la separación entre los anclajes y tornillos sino también a su disposición respecto al eje de unión, siendo en este caso una disposición estrellada, favoreciendo el equilibrio de fuerzas por simetría

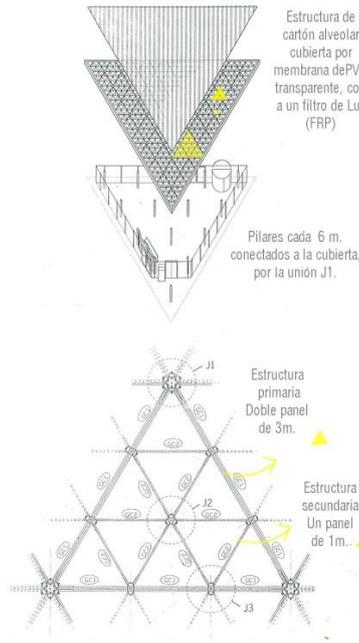
³³ Ver McQuaid ,Mathilda: *Shigeru Ban*, Phaidon , NY, 2003, pg 80-83: Estudios del Profesor Minoru Tezuka sobre estructura de cartón alveolar hexagonal, del Museo de arte infantil de Nemunoki.

Proyecto



Nemunoki Children's Art Museum, Shizuoka Japan, 1999. Shigeru Ban

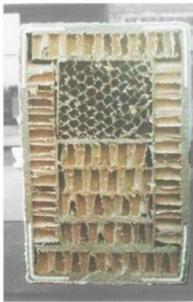
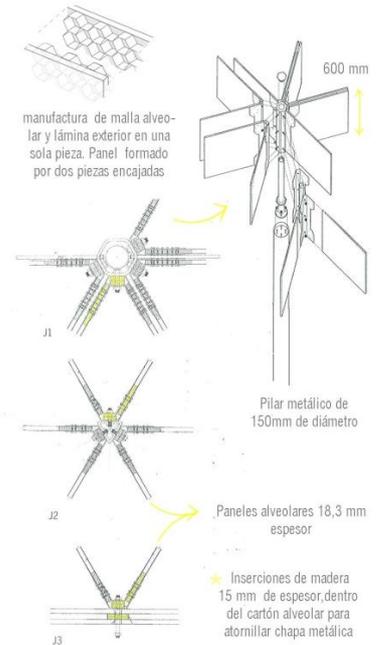
Ensamblaje



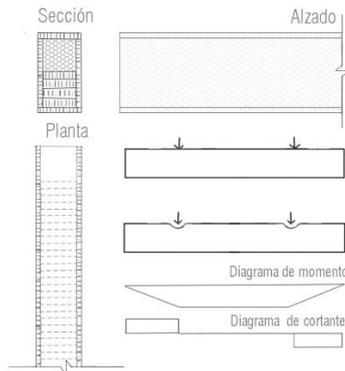
Escala proyecto

XL

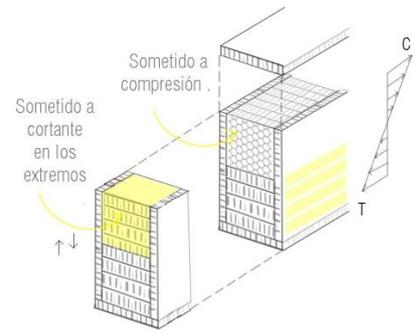
Elementos constructivos



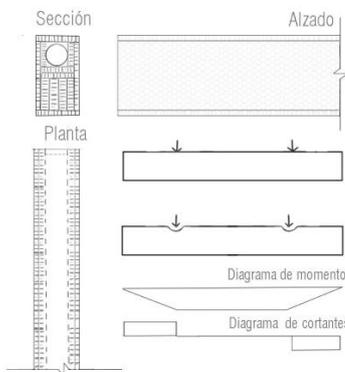
Prototipo Viga-3: TUDelft.. Pruebas en laboratorio



L



Prototipo Viga-4: TUDelft.. Pruebas en laboratorio



L

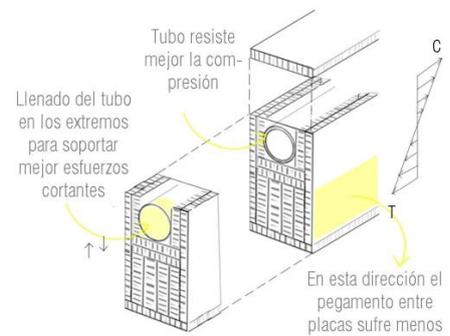


Figura 16. [16.1] Nemunoki childrens art museum, Shizuoka, Japan, Shigeru Ban, 1999. [16.2] Prototipo viga-3, cartón alveolar, TUDelft, Julia Schönwälder, 2004 [16.3] Prototipo viga 4, cartón alveolar, TUDelft, Julia Schönwälder, 2004

La estructura se compone de tres materiales: madera, cartón y metal. El cartón al ser el material con menor resistencia necesita un material de transición que permita la unión a la pieza metálica, por ello se hacen unas inserciones de madera en los extremos del cartón alveolar para evitar que el cartón se rasgue al no poder soportar los esfuerzos transmitidos por estas uniones metálicas. La estructura primaria se compone de doble panel de cartón alveolar siendo cada panel de 300 x 60 x 1,83 cm, formando el módulo triangular mayor dentro del conjunto, al cual se unen submódulos (con la unión tipo J2) de piezas cartón alveolar de 100 x 60 x 1,83 cm también con inserciones de madera. Los módulos mayores se unen entre sí, por sus vértices con la unión J1 y entre sus caras con las uniones J3. La cubierta va unida a los pilares por la unión tipo J1. La utilización de pilares metálicos circulares hace pensar, en por qué Shigeru no utiliza sus míticos tubos de cartón, ¿Por qué no construir el edificio puramente con piezas de cartón? La respuesta podría estar relacionada con aspectos estructurales; La distancia de 6 metros entre pilares podría dar a pensar que un pilar en cartón además de tener mayor diámetro, también este podría estar sometido a fuerzas laterales, no siendo idóneas para tubos de cartón, ya que estos trabajan de manera optimizada a compresión pura. Por todo ello podría haberse tomado la decisión de utilizar pilares metálicos.

En la figura 15.2 y 15.3 vemos prototipos de vigas realizados en la universidad de TUDelft (siendo elementos más convencionales que el ejemplo anterior de cubierta) compuestas por diferente disposición de cartón alveolar. La disposición de los diferentes planos en el prototipo de viga-3, responde positivamente a los esfuerzos dentro de la sección de la viga. En los extremos de la viga (sometidos a cortante) se refuerza cambiando de orientación las láminas interiores superiores (de vertical a horizontal). La viga llegó a resistir 400kg; no presentó rotura frágil una vez superada su resistencia máxima. Presentó un comportamiento plástico casi ideal. Apareció pandeo local en los puntos de transmisión de carga debilitando la zona de compresión.

En el prototipo de viga-4 (figura 15.3) se optimizó la viga anterior; se sustituyó las placas alveolares superiores sometidas a compresión por un tubo de cartón, geométricamente más apropiado para soportar la compresión en la parte superior de la sección; También se cambió de sentido de las placas alveolares hexagonales para soportar mejor la tracción en la parte inferior de la sección. La viga Soportó 600kg. En este caso la viga falló por tracción y no por compresión como se esperaba debido a la alta capacidad resistente del tubo a compresión. La viga sufrió rotura frágil apareciendo una grieta y colapsando al instante.

Para poder llegar a estandarizar este tipo de vigas habría que llegar a un equilibrio, disponiendo paneles atendiendo tanto a rotura frágil como a resistencia máxima.

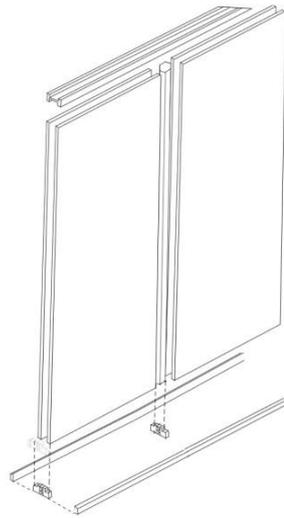
En el caso de la figura 17.1 se analizó la posible producción de tabique compuesto de paneles de cartón alveolar hexagonal, pudiendo sustituir los tabiques convencionales, prestando el mismo servicio siendo más ligero, por ello fácil y rápido de montar y más económico y ecológico por ser de papel.

Proyecto



Proyecto 4.2.6
.Maria den Boon
TUDelft_2004

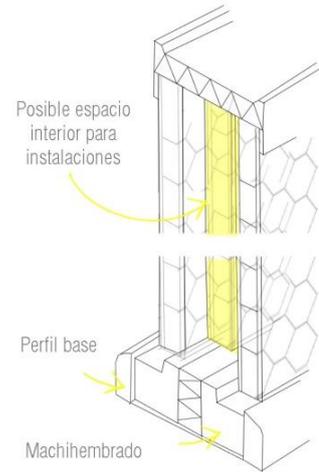
Ensamblaje



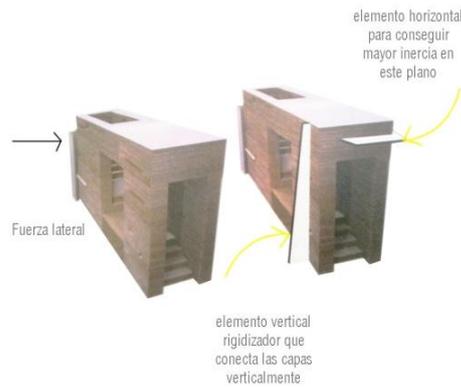
Escala
proyecto

M

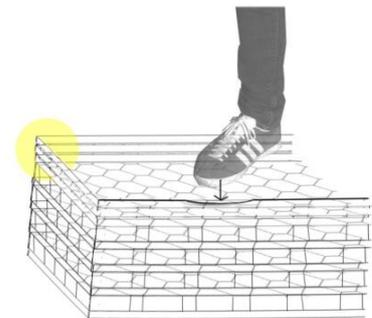
Elementos
constructivos



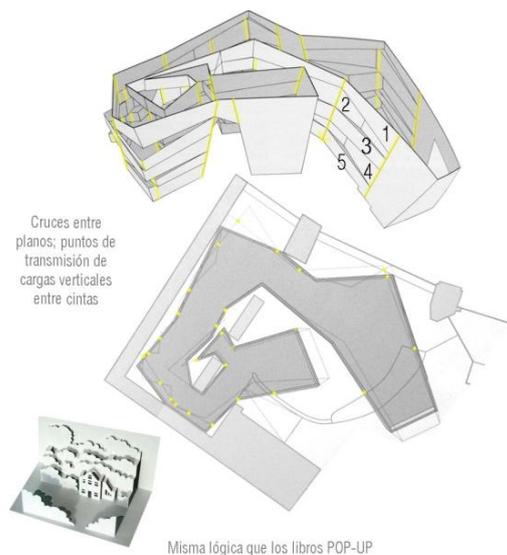
Cardboard Pavilion.
Faculty of Architecture
TUDelft_2006



L



Trial and Error exhibition.
Magma architectures.
Building Centre Trust.



L

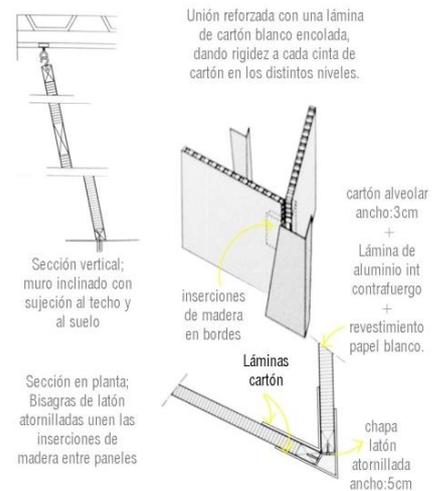


Figura 17 [17.1] Proyecto 4.2.6 TUDelft, Maria den Boon, 2004. [17.2] Cardboard Pavilion, Facultad de arquitectura TUDelft, 2006. [17.3] Exhibición "Trial and Error", Building centre trust, Magma architecture, London

Consiste en dos placas de cartón alveolar, encajadas en un perfil base en plástico mediante un sistema machihembrado. El espacio entre placas útil para pasar instalaciones y en su defecto más placas de cartón, para mayor aislación.

El pabellón propuesto por la universidad de arquitectura de TUDelft (figura 17.2) es uno de los pocos ejemplos que usan cartón alveolar dispuesto de manera horizontal. Consiste en un muro formado por capas y capas de cartón alveolar encoladas entre sí horizontalmente. Las escaleras y la terraza superior son los puntos críticos ya que son superficies horizontales sobre las que actúan cargas puntuales, provocando deformaciones locales en la superficie, por ello se refuerza en la lámina superior de cartón con mayor número de láminas de cartón macizo, para que absorba la deformación producida al caminar sobre la superficie. Al ser de disposición horizontal las placas son vulnerables en su conjunto a fuerzas laterales por la debilidad de su unión con adhesivo, provocando desplazamiento horizontal de los paneles. Por ello necesitaría rigidizadores que arriostren y conecten las capas; uno lateral dispuesto verticalmente, de geometría trapezoidal absorbiendo mayor momento en la base y otro rigidizador en la zona más alta para obtener mayor inercia en el plano horizontal. El pabellón aparte de ser analizado estructuralmente, se sometió a pruebas de resistencia contra el fuego, siendo algo que parece imposible tratándose de papel. Pero lo cierto es que de las pruebas realizadas sobre el papel, se obtuvieron resultados de comportamiento similar al de la madera; el material se recubre a sí mismo de cenizas para evitar que arda.

En la figura 17.3, un pabellón de Magma architecture, cinco cintas de cartón de altura irregular se van moviendo y plegando, de manera que la inferior haga de soporte de la cinta superior y viceversa. Plegando las cintas con cierta geometría triangulada obtenemos mayor estabilidad, haciendo que las cargas verticales se transmitan en los cruces de planos. Localmente los paneles alveolares han sido reforzados con pequeñas inserciones de madera en sus bordes para repartir mejor la carga a lo largo de la cara superficial de los paneles. Los paneles no trabajan estructuralmente hasta que no son fijadas las uniones entre ellos en cadena, llegando a un equilibrio de fuerzas. Como vemos en los ejemplos anteriores las placas alveolares son estables en ambas direcciones, tanto perpendicular al suelo como horizontales al suelo. La propuesta de Maria de Boon, es un ejemplo de un sistema en el que el cartón no es auto-portante y necesita una subestructura para hacerlo estable; por ello no difiere mucho del sistema convencional de subestructura metálica y placas de yeso para particiones interiores de edificios; aunque sí es cierto que difiere notablemente en su ligereza y en su coste. En el caso de ambos pabellones (TUDelft pavillion y Trial and Error exhibition) con ejemplos de estructuras de cartón auto-portantes ya que no necesitan literalmente de una subestructura para sostenerse. En la exhibición de "Trial and Error", El cartón es híbrido con otros materiales en sus uniones, siendo la cuestión clave en el proyecto.

Su geometría hace pensar en la posibilidad de hacer este proyecto a partir de una gigante y única pieza de cartón alveolar, recortando las líneas apropiadas para hacer las cintas de una sola pieza siguiendo la lógica de los libros POP-UPS, para hacer de un

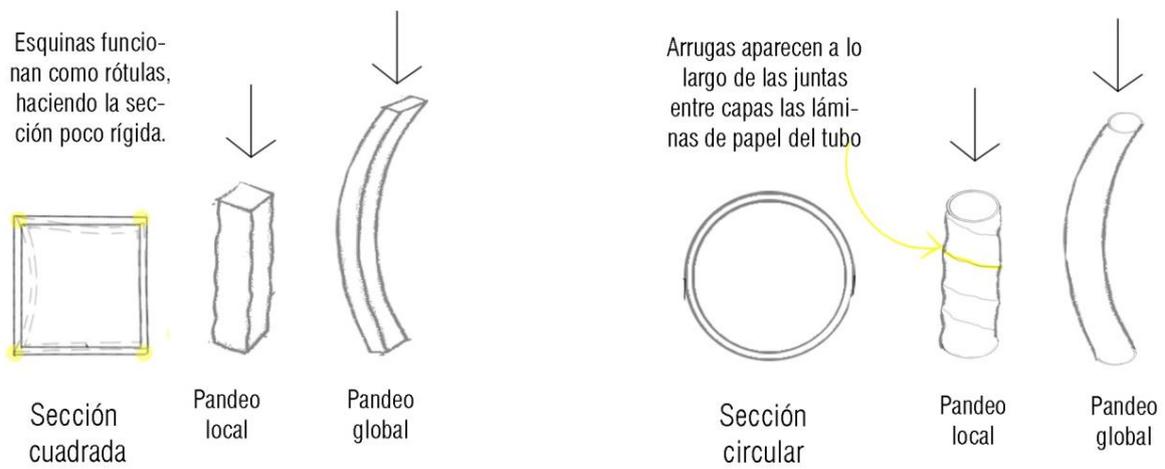
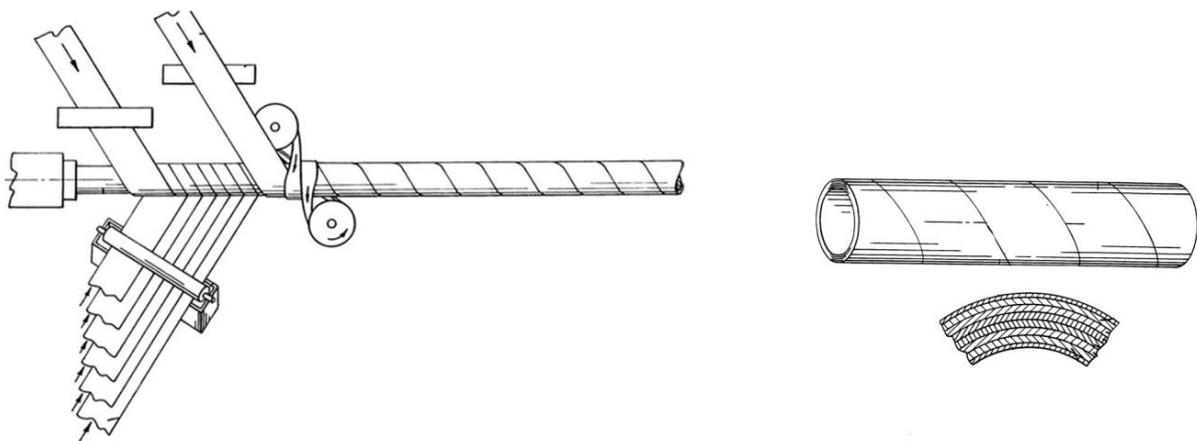


Figura 19. Esquema comparativo entre sección cuadrada (pilar) y sección circular (columna) en cartón



La distancia entre cintas de papel a lo largo del tubo es fundamental, ya que un mal solapamiento de las mismas podría llegar a producir arrugas en el tubo y posteriormente el fallo de la estructura.

Espesor en función del número de capas de papel encoladas

Figura 18. Manufactura de tubos de cartón. EP 0627306 A1. IFI CLAIMS Patent Service, 2012

solo plano esbelto y de poco grosor, una geometría que haga más estable a la lámina de papel en disposición vertical. El pliegue de una misma pieza haría imposible controlar el comportamiento del material en los pliegues y esquinas. Por ello la fabricación de piezas independientes de cartón ensambladas con uniones previamente estudiadas y calculadas hace mucho más precisa y segura la estructura de cualquier proyecto de cartón.

4.3.3 Tubos de cartón

La columna ha sido por mucho tiempo el soporte de muchas edificaciones desde templos, hasta casas particulares. Los tubos de cartón pueden aparentar tener el mismo comportamiento que una columna común, pero al estar hueca y ser de papel su rigidez depende de su espesor del cartón, su manufactura, longitud, diámetro y las uniones a otros elementos de la estructura, para transmitir correctamente las cargas. La geometría cilíndrica hueca no es la más idónea para soportar pandeo general de la columna, ya que tiene menos masa en ejes principales y por ello menos inercia en comparación con la sección cuadrada (figura 18). La buena manufactura del tubo de cartón, disminuye la posibilidad de que haya pandeo local, siendo zona crítica las juntas entre cintas enrolladas de papel del tubo. El papel generalmente como material trabaja de manera similar a compresión y a tracción como hemos ido viendo en anteriores ejemplos. Su buen comportamiento ante esfuerzos depende de la geometría que adquiera el elemento en cartón. La ventaja de usar el tubo es la ausencia de esquinas o pliegues, ya que la transmisión de cargas es continua siendo mucho más fácil de controlar el comportamiento, y mucho más fácil que diseñar y manufacturar que diseñar el encuentro entre los planos de sección cuadrada, siendo una zona débil en la sección, provocando deformaciones locales en el pilar. Los tubos de cartón empezaron a ser utilizados dentro del mundo de la construcción como encofrados de columnas de hormigón. Shigeru Ban, hace ya un tiempo empezó a usar estos tubos para realizar estructuras en edificios, aunque su primer contacto con cartón fue en 1986 con tubos de menor escala, no estructurales, para la exposición en Tokyo de artistas y la obra del arquitecto Alvar Aalto (conseguía el mismo efecto de los techos de madera ondulados de Aalto, pero con un material mucho más económico, el cartón). Shigeru Ban tras realizar varios proyectos con materiales convencionales, volvió a usar el cartón en 1989 y esta vez verdaderamente lo usaba para la propia estructura y a su vez creando la imagen por la que, hasta hoy, se conocen muchos de sus proyectos; muro continuo compuesto por tubos de cartón alineados. Ban, además de utilizar tubos en disposición vertical, como columnas, también investigó la manera en hacer que estos tubos pudiesen formar parte de la cubierta, llegando a estructuras mucho más complejas, creando mallas de tubos de cartón donde la unión entre cada pieza de cartón volvía a ser el punto crítico de la estructura ayudándose de otros materiales más resistentes como metal o madera. Analizaremos como caso de estudio la obra de Shigeru Ban, ya que intensamente ha desarrollado (entre otros) diferentes sistemas constructivos específicos para tubos de cartón.



- [1] Emilio Ambasz Exhibition,1985, Tokyo, Japón [2]Alvar Aalto exhibition, 1986, Tokyo, Japón [3]Judith Turner Exhibition, 1986 Tokyo, Japón. [8]Paper Arbor, 1989, Aichi, Japón. [11] Odawara festival Hall, 1990, Kanagawa, Japón. [12]East Gate Odawara Festival, Kanagawa, Japón. [14]Library of a poet, 1991, Kanagawa, Japón. [25]Miyake, Design Studio,1994, Tokyo, Japón. [27]Paper House, 1995, Yamanashi, Japón. [30] Paper Log-house, 1995, Kobe Japón. [31]Paper church, 1995, Kobe, Japón. [39]Paper dome, 1998, Gifu, Japón. [42] Paper emergency shelters, 1999, Byumba, Rwanda. [43]Nemunokichidrens art museum, 1999, shizuoka, Japón. [45] Paper Log housetureky, 2000, Turjeý. [46]Paper Arch, 2000, NY, USA. [47]Japan Pavillion EXPO Hannover, 2001, Alemania. [54]Paper Log House-India, 2001, Bhuj, India. [66]Paper Studio. Kanagawa, Japón. [72]Amsterdam Paper Dome, 2003, IJburg, Holanda. [81] Paper Studio, 2003, Kanagana, Japón. [82] Paper Partition system 1, 2004, Niigata, Japón. [83] Nomadic Museum, 2005, NY, USA. [84] Centro de interpretación del canal de Bourgogne, 2004, Francia. [85] Papillon Pavillion, 2006, Paris, Francia. [86] Singapore Biennale, pavilion, 2006, Singapore. [87] 8aper Bridge, 2007, Remoulin, France. [88] Hualin temporary elementary school, 2008Chengdu, China. [89] Paper Tea House, 2008, Londres. [90] QuitanaBotánica, 2009, Algarve, Portugal. [91] BI-CITY biennale pavillion, 2009, Hong Kong, China. [92]Camper Traveling Pavillion, 2011 [93] Hermes pavillion, 2011. [94] Paper Atelier, 2011, Onagawa, Japón. [95] Paper Concert hall, 2011, Láquila, Italia.[96] Paper Partition System 4, 2011 [97]Cardboard Cathedral, 2013, Nueva Zelanda. [98]]Museum Rietberg Temporary Pavillion,2013, Zurich, Suiza. [99] Madrid Paper Pavillion,2013, España. [100]Paper Nursery School,2014 Sichuan, China [101]Yakushima Takatsuka lodge, 2013, Japón. [102]Paper Log house, 2014 Philipinas.

Figura 20. Imágenes de McQuaid ,Mathilda: *Shigeru Ban* , Phaidon, NY, 2003, pg234-237, completada

5. CASO DE ESTUDIO. SHIGERU BAN

5.1 Breve biografía

Nació en Tokyo; En 1957 estudió arquitectura en *SCI-ARC (Southern California Institute)* y *Cooper Union* (con John Hejduks como mentor) cogiendo influencia de la arquitectura estadounidense mezclándola con su arquitectura natal japonesa. Su mentor John Hejduks introdujo a Shigeru Ban a conocer no sólo elementos básicos de la arquitectura (marco estructural, pilar, viga...) sino también el arte de crear poesía arquitectónica, poesía tridimensional a través de la composición de geometrías básicas, que en adelante reflejará en sus proyectos y sus soluciones constructivas. Más tarde Trabajó para Isozaki, Arata en Tokyo su ciudad natal. En 1985 abrió su despacho y durante los siguientes años, comenzó su labor docente en *Tama Art University*. En 1995 trabajó para naciones unidas llevando a cabo arquitectura de emergencia y a la vez, en este mismo año fundó, su propia organización humanitaria VAN (Voluntary Architects' Network). Así, Shigeru Ban, comenzó a abrir fronteras entre la arquitectura humanitaria y arquitectura material. Utilizando el cartón, más normalmente atribuido a construcciones espontáneas de gente sin techo o refugiados, Shigeru Ban consigue que la calidad en cualquiera de sus construcciones este siempre presente, alejando al cartón de ser desvirtuado. Omite en ambas arquitecturas, 'structure-for-structures' sake³⁴, es decir, evita que sus construcciones tengan una postura meramente estética o formal, siendo proyectos en el que el material utilizado atiende fundamentalmente a su estructura, en función a su función a desempeñar, omitiendo todo tipo de subestructuras innecesarias, sacando el máximo partido a dicho material: el papel. No obstante Ban habla de "estructura invisible", cuando habla de sus proyectos, refiriéndose a que la estructura no es algo independiente a la imagen, si no que forma parte de ella, siendo 'invisible'.

La sostenibilidad atribuida por la materialidad de los proyectos de Shigeru Ban viene dada implícitamente, ya que sus comienzos en el cartón, fueron por la necesidad que usar algo accesible y económico, dando como referencia sus tres primeros proyectos como arquitecto: la exposición de Emilio Ambasz (1985), la exposición de Alvar Aalto (1986) y la exposición de Judith Turner (1986). En las tres se utiliza papel (cartón), pero aún, sin ser estructural, abren un frente de investigación para Shigeru Ban, dado por una pre-reflexión de reutilización de este material como soporte en las exposiciones mencionadas, y seguida por una post-reflexión de las posibilidades futuras de este material, lo que llevó a Shigeru Ban (tras varios proyectos sin utilizar cartón) a volver a trabajarlo y realizar su primer edificio con estructura de cartón, *Paper Arbor*³⁵, en 1989. Y desde entonces no ha dejado de investigar nuevas formas de utilizar los tubos de cartón para sus edificios. Aunque sea mundialmente conocido por sus construcciones en papel, pudiéndonos referir a Shigeru Ban como arquitecto del papel, ha realizado proyectos en otros materiales (cartón, madera, bamboo, hormigón). Aunque sus proyectos se puedan clasificar de manera clara y simple, como estructuras prefabricadas según cuál sea el material predominante en la estructura; poder comparar los proyectos según su método constructivo da pie a poder comprender mejor porqué ese material y porque esas piezas de unión determinadas. De manera lógica ha ido mejorando, retomando soluciones anteriores, y modificándolas en posteriores proyectos.

³⁴ Ver McQuaid, Mathilda: *Shigeru Ban*, Phaidon, NY, 2003, pg 7

³⁵ Ver Ban, Shigeru: *Paper Arbor, Paper Tube structure*, Nagoya, Aichi, Japón, 1989

Proyecto

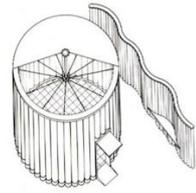
Ensamblaje

Escala proyecto

Elementos constructivos



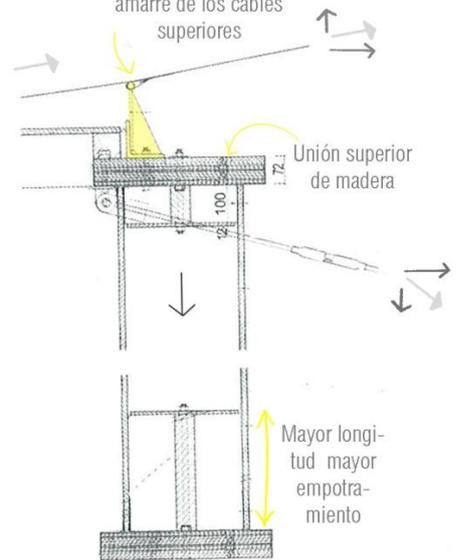
Paper Arbor
Shigeru Ban
Aichi, Japan_ 1989



L

Detalle constructivo Paper Church

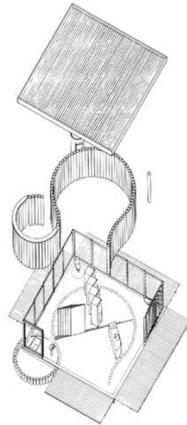
Perfil en L del anillo superior que conecta todos los tubos + perfil triangular de amarre de los cables superiores



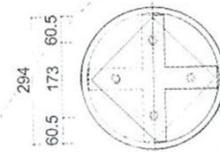
Unión superior de madera
Mayor longitud mayor empotramiento



Paper house
Paper Tube structure 05
Shigeru Ban
Yamanashi. Japan_ 1994



L



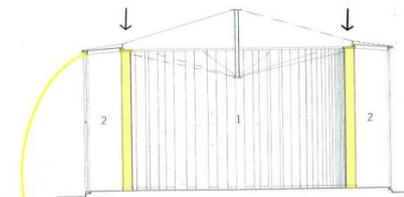
Uniones cruceiformes de madera. Tienen misma geometría pero distinta altura. La unión inferior al suelo tiene mayor altura considerando así que está empotrada. La parte superior al tener menos altura se acercaría más al comportamiento de rótula.



Miyake Design Studio Gallery
Paper Tube Structure 06
Shibuya. Japan_ 1994



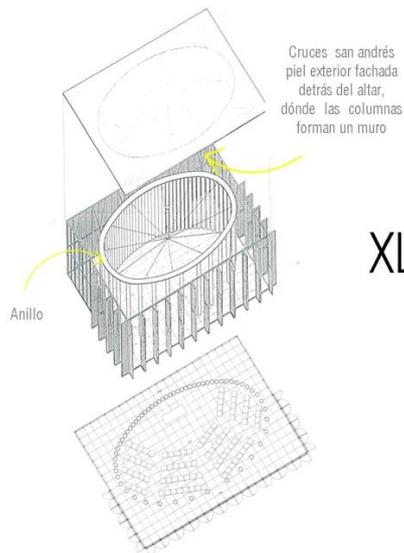
L



Perfil de madera unido al cable, estabiliza la carpintería exterior, no forma parte de la estructura principal. Las carpinterías metálicas exterior protege a las columnas de cartón, llevando las cargas laterales de viento, absorbidas por cables dispuestos en X en la misma carpintería.



Paper church
Paper tube structure 08
Kobe. Japan_ 1995



XL

Figura 21. [21.1] Paper Arbor, Aichi, Japón, Shigeru Ban, 1989. [21.2] Paper house. Paper tube structure 05, Shigeru Ban, Yamanashi, Japón, 1994. [21.3] Miyake Design Studio Gallery, Paper tube structure 06, Shigeru Ban, Shibuya, Japón, 1994. [21.4] Paper Church, paper tube structure 08, Shigeru Ban, Kobe, Japón, 1995.

5.2 Casos de estudio

La intensidad con la que resuelve sus detalles constructivos para producir una imagen específica, básicamente es de lo que en general trata la arquitectura prefabricada.

En sus proyectos apreciar el detalle es apreciar el proyecto; las geometrías básicas que con la que Ban proyecta y lleva a cabo en sus edificios, requiere lógica constructiva, y más aún con un material barato y poco utilizado (en la construcción) como es el cartón. Se intenta llegar a un equilibrio entre lo más barato y lo más durable, en arquitectura temporal, de ahí que use el cartón y resuelva las uniones entre materiales de la manera más resistente posible frente a todos los agentes a los que esté sometido. Se identifican varios grupos de proyecto según la disposición y por tanto la manera en que los tubos trabajan en la estructura (figura 20): Tubos verticales (8, 11, 25, 27, 31, 45, 54, 90, 92, 93, 95, 96, 98, 99, 102); Tubos formando una malla estructural, tanto para vigas, bóvedas y cúpulas (14, 39, 42, 47, 66, 72, 81, 84, 85, 87, 91) y excepciones como el museo de Nemunoki (43) para niños que ya se ha explicado en el apartado de cartón alveolar entre otros; Tubos en disposición triangular como la catedral de cartón en Nueva Zelanda o Nomadic museum entre otros (83, 88, 93, 94, 97, 102); y por último tubos formando cerchas en una malla tridimensional, salvando grandes luces (86, 99).

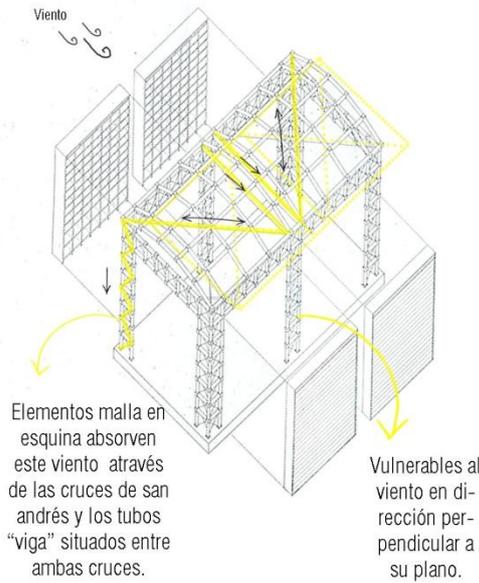
En la figura 21 se observan varios ejemplos donde el cartón ha sido dispuesto verticalmente, formando una fachada continua de tubos de cartón. Vemos que desde 1989, la escala de los proyectos formados por tubos verticales de cartón ha aumentado y, por ello, también en paralelo la dimensión de los tubos utilizados (diámetro y espesor en función de su longitud). Se escoge el proyecto en el que vemos que ha llegado a escala XL, para ver en qué medida trabaja el cartón y cuál es su papel dentro del proyecto. Hable se del proyecto de Paper Church (figura 21.4); La simetría respecto a sus ejes no es casual, los tubos generalmente en disposición vertical, trabajan de manera óptima a compresión, por ello la necesidad de evitar cualquier tipo de fuerza lateral en la fachada de tubos es primordial. Se dispone una cubierta textil, mediante un sistema de cables los cuales se amarran a un anillo metálico perimetral anclado sobre los tubos llegando a un equilibrio de fuerzas laterales respecto a sus ejes. Por ello los tubos no hacen más que soportar el peso propio de la cubierta. La pared tubular se protege con una doble fachada de policarbonato y de pletinas metálicas, no estructurales, amarradas mediante un perfil de madera superior y cables siguiendo los ejes de cables de la cubierta textil, absorbiendo esta todos los esfuerzos laterales sobre esta doble fachada. Por tanto, vemos que definitivamente los tubos han sido dispuestos para trabajar en su dirección axial, es decir, a compresión pura. La unión de los tubos al suelo, se hace mediante piezas de madera en forma de cruz, introducidas en el interior del tubo en su extremo inferior. La unión superior a la cubierta utiliza la misma geometría en cruz, pero siendo de menor altura. La altura de esta unión depende del nivel de empotramiento que se quiera atribuir a la unión; cuanto mayor longitud tenga la unión dentro del tubo mayor será el nivel de empotramiento. En este caso se ha decidido que la unión inferior tienda a ser empotramiento y la unión superior tienda a ser rótula. Podría compararse con un pórtico empotrado en la base y con rótulas en las esquinas superiores, dirigiendo la fuerza lateral ejercida sobre los tubos (en el caso de que hubiera, por ejemplo si hubiese viento cuando las ventanas estuviesen abiertas) directamente por el mismo tubo de cartón hasta el suelo sin necesidad de pasar por la cubierta, haciendo permanecer la fuerza menos tiempo en la estructura.

Proyecto

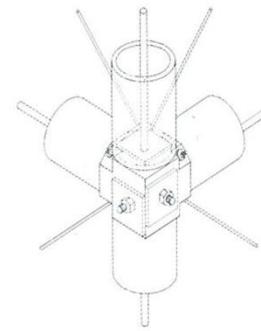
Ensamblaje

Escala proyecto

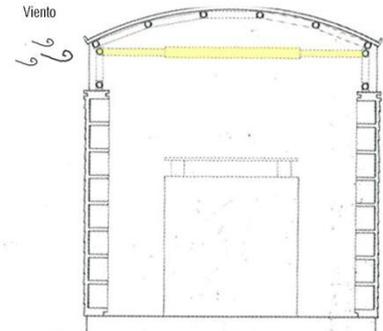
Elementos constructivos



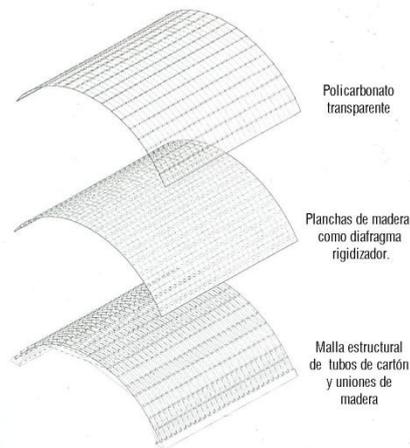
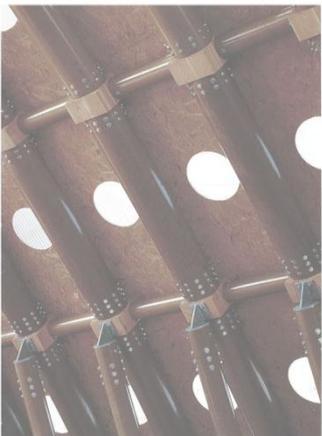
XL



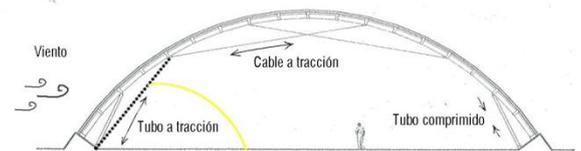
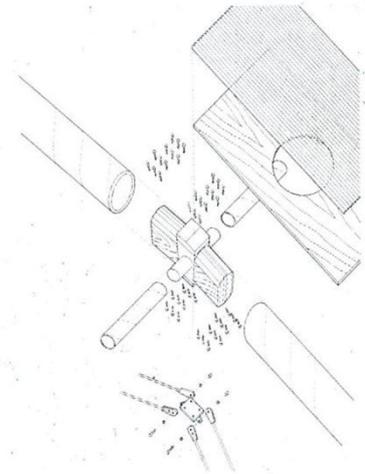
No sólo para transmitir, la fuerza del viento a las cruces de san andrés, sino también para contener el arco.



Library of a poet. Paper Structure 04
Shigeru Ban
Kanagawa, Japan_1990



XL



A medida que el arco se acerca al suelo, más perpendicular es la superficie al viento; necesita un elemento de refuerzo en esta zona contra el viento; Poner un elemento más largo, alargaría la transmisión de la fuerza al suelo, siendo contraproducente.

Paper Dome. Paper Tube Structure 09
Shigeru Ban
Masuda, Gifu, Japón_1998

Figura 22. [22.1]Library of a Poet, Paper structure 04, Shigeru Ban, Kanagawa, Japón, 1990 [22.2]Paper Dome, Paper Structure 09, Shigeru Ban, Masuda, Gifu, Japón, 1998

El siguiente grupo de estructura apareció según el orden cronológico; Tubos formando una malla estructural. En 1990 Ban como tercer proyecto en tubos de cartón decidió utilizar un módulo en forma de arco repetidamente formando una bóveda como cubierta, para construir la biblioteca para un poeta (figura 22.1). Podríamos empezar a hablar de cómo Ban crea un espacio con luz tenue, y como divide el espacio en dos mediante la ventana en el medio de los muros alargados..etc. Pero para verdaderamente comprender este espacio, es necesario no atribuir todas sus cualidades a decisiones meramente estéticas o lumínicas, sino mayoritariamente a decisiones estructurales. Shigeru Ban llega a su arquitectura a través de sus detalles constructivos.

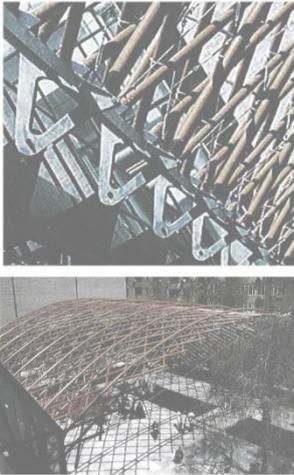
La disposición de los tubos de cartón en forma de arco, hace que la estructura de la cubierta tienda al lado de la seguridad, llevando las cargas de una manera más continua hacia los elementos verticales laterales hasta el suelo. Si fuese una disposición horizontal se someterían los tubos a mayor esfuerzo de flexión.

Observamos que hay 6 elementos (cerchas verticales formadas por tubos, uniones de madera y cables) que conectan la cubierta al suelo. Los dos elementos verticales centrales, es decir, los que no están en esquina son vulnerables al viento en dirección perpendicular a la fachada larga del edificio, por ello la fuerza del viento debe ser transportada a cualquiera de los 4 elementos en esquina. Para ello se dispone dos tubos horizontales, alineados con los dos elementos verticales vulnerables al viento, y dos cruces de san Andrés (dos y no una, ya que las cruces deben de disponerse con una inclinación alrededor de 45º) para transmitir las cargas de los estos tubos horizontales a través de los cables hasta los elementos en esquina. Los tubos que forman la malla estructural se encuentran pos-tensados, pudiendo soportar así mejor la flexión, si la hubiese. El tubo dispuesto horizontalmente debajo del arco, tiene mayor grosor en parte central para poder soportar mejor la compresión del tubo por viento y en el caso de que no hubiese viento, simplemente estaría a tracción reteniendo al arco.

En la figura 22.2 se presenta otro ejemplo de malla estructural modulada por tubos en forma de arco formando una bóveda, en este caso el arco directamente apoya sobre el suelo (el cual absorbe la línea de tensión del arco). La cimentación de los tubos es de cemento. En arco lleva el peso propio de los tubos al suelo de manera de continua y fluida. A medida que el arco va acercándose al suelo, su inclinación empieza a ser vertical siendo más vulnerable a fuerzas laterales de viento, necesitando un refuerzo interior que el arco sufra flexión. En este caso se decide poner tubos de cartón de refuerzo en vez de cables, haciendo trabajar ambos tubos en cada lado del arco (uno a compresión y otro a tracción), mientras que si fuesen cables, trabajaría solo el que estuviese sometido a tracción. En la parte superior también se refuerza con cables el arco por la misma razón, quizás no utilizando tubos ya que su peso sería mayor.

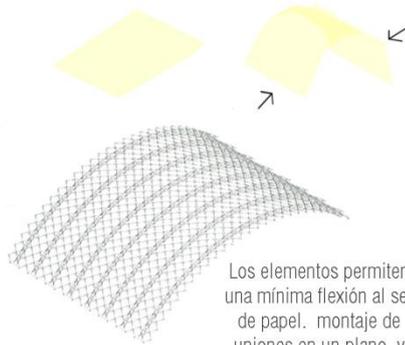
La bóveda se forma a partir de la repetición de estos arcos unidos entre sí mediante tubos de cartón, en dirección perpendicular al plano del arco, utilizando las piezas de madera entre los tubos que forman dicho arco. Toda la estructura de esta cubierta se refuerza y rigidiza utilizando paneles de madera, perforados para dejar entrar luz. La madera finalmente se protege con piezas de policarbonato transparente, para proteger del agua todo el conjunto estructural.

Proyecto



MoMA exhibition,
Shigeru Ban
Nueva York_2001

Ensamblaje



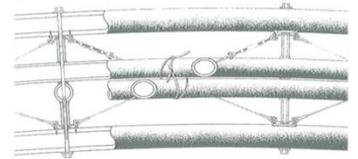
Los elementos permiten una mínima flexión al ser de papel. montaje de uniones en un plano, y posteriormente, comprimir la malla para generar la bóveda.

Escala proyecto

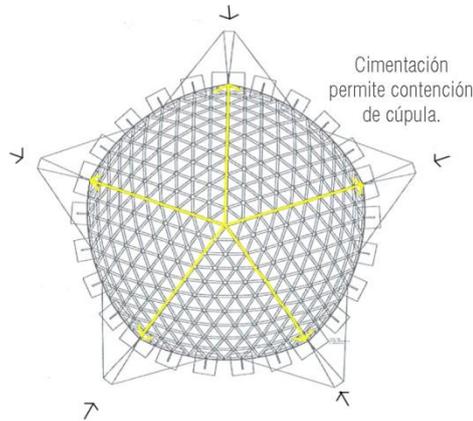
X XL

Elementos constructivos

La escala de esta bóveda haría innumerable y complicada las uniones entre todos los elementos de cartón. Las uniones entre tubos se realiza entre mallas estructurales de tubos en diferente plano atados con cuerdas e intercaladas con cables



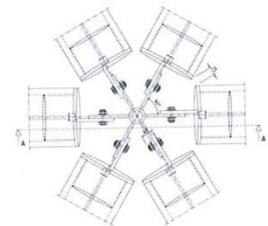
Paper Dome,
Shigeru Ban,
Ijburg, Holland_2003



Cimentación permite contención de cúpula.

Arco de entrada para llevar cargas a cimentación.

XL



Conexión con cierto ángulo, ya que los elementos tubulares permanecen rígidos en su construcción

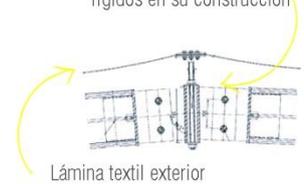
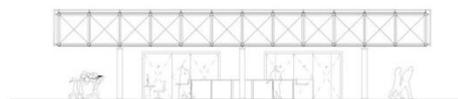


Lámina textil exterior



Singapore Biennale
Pavillion,
Shigeru Ban
Singapore_2006



Cercha tridimensional: elementos trabajan con fuerzas axiales, evitando flexión de dichos elementos.

XL



Figura 23. [23.1] Moma exhibition Paper Arch, Shigeru Ban, New York, 2001 [23.2] Paper Dome, Shigeru Ban, Ijburg, Holanda, 2003 [23.3] Singapore Biennale Pavilion, Shigeru Ban, Singapore, 2006

Shigeru siguió llevando más allá los límites de los tubos esta vez en la exhibición retrospectiva de arte en el MoMa de Nueva York con una bóveda formada por tubos de 20cm de diámetro, de 24 m de altura, y 24 m de distancia entre apoyos. La complejidad de generar una bóveda de estas dimensiones hizo necesario formar una malla de tubos en diferentes planos llegando a tener 60 cm de espesor la pared de la bóveda. Los tubos entre planos se unen mediante cuerdas, generando rótulas que permiten la flexión de los elementos tubulares durante su erección, después de haber sido ensamblados en plano.

Este proyecto sirvió de prueba para la construcción de ese mismo año del pabellón de la exposición de Hannover en Alemania, superando innumerables de exigencias técnicas y normativa en su construcción.

En el proyecto de Paper Dome en Alemania (figura 23.2), Ban propone una cúpula geodésica, la gran diferencia de malla estructural a la anterior con arcos es su proceso de construcción. El anterior proyecto (figura 23.1), la malla puede ensamblarse en plano y posteriormente comprimir la malla hasta elevarla para formar la bóveda, deformando los tubos que permiten cierta flexión; en cambio la cúpula no puede construirse en plano. La malla tridimensional se compone de elementos triangulares formados por tubos, los cuales no llegan a flexión permaneciendo rígidos antes, durante y después de su ensamblaje. La inclinación de los tubos a lo largo de la cúpula se consigue con el nexo de unión metálica, teniendo una cierta inclinación para ir formando poco a poco la curvatura.

La cúpula es contenida y amarrada al suelo en cinco puntos en los cuales se encuentran la cimentación en hormigón. Entre estos puntos de apoyo al suelo, se generan en alzado unos arcos, para permitir que las cargas de la malla estructural sean transmitidas a la cimentación. Estos arcos permiten la entrada al interior del edificio.

El último grupo que nos queda por analizar es aquel con tubos en disposición triangulada; donde los tubos generan el esqueleto estructural con el esquema básico de una casa: dos tubos de cartón como pilares y tres tubos en disposición triangular, como una cubierta a dos aguas, reflejado por ejemplo en el proyecto de Paper Atelier en 2011 (figura 24.1).

La diferencia entre esta disposición triangulada en un plano vertical (figura 24), y una disposición formando un arco en un plano vertical (figura 21), es que la distancia entre nodos: en la disposición triangulada es mayor que la distancia entre nodos en un arco, haciendo que los tubos tengan que salvar mayor distancia entre nodos, siendo más vulnerables y flexar.

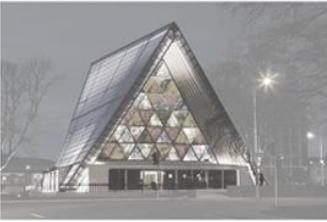
Cuando Ban utiliza esta disposición en una escala L, (figura 24.1) la inclinación tiende a ser más horizontal ya que sí, se puede manufacturar unos tubos con ciertas dimensiones (espesor, diámetro, longitud), para soportar flexión. Pero a la hora de aplicar esta disposición en escala XL, como es el caso de La catedral de cartón en Nueva Zelanda (figura 24.2), la inclinación de los tubos tiende al plano vertical evitando lo más posible la flexión, ya que al ser una dimensión mayor hace que la manufactura del tubo pueda ser más complicada de controlar y que por tanto afecte al comportamiento del tubo negativamente. La catedral, tuvo ciertas complicaciones a la hora de su construcción: La lluvia excesiva en el período de ensamblaje hizo que los tubos se empapasen en agua, ocasionando deformaciones (variando la geometría de sección tubular) y por ello, la disminución de sus capacidades resistentes. Se tuvieron que

Proyecto

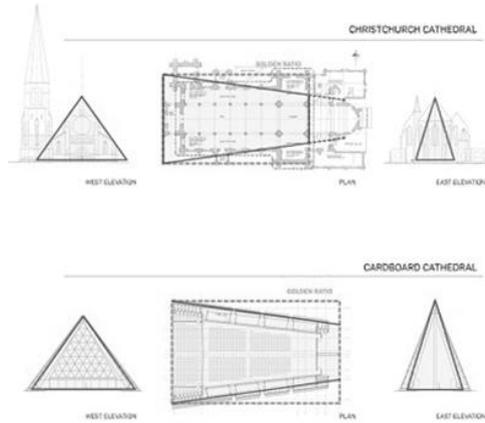
Ensamblaje

Escala

Elementos constructivos

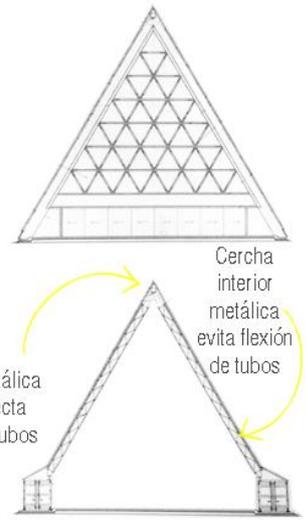


Cardborad Cathedral
Nueva Zelanda
Shigeru Ban_2013



Geometría de la anterior catedral abstraída y llevada a geometría básica para proyectar la nueva iglesia en tubos de cartón.

XXL



Estructura metálica en cimentación



Figura 25 Disposición triangulada de tubos en cartón en orden de escala. [24.1] L . Paper Atelier, Onagawa, Japón, 2011 [24.2] XL. Nomadic Museum, Nueva York, 2005 [24.3] XXL. Card board Cathedral, Nueva Zelanda, 2013

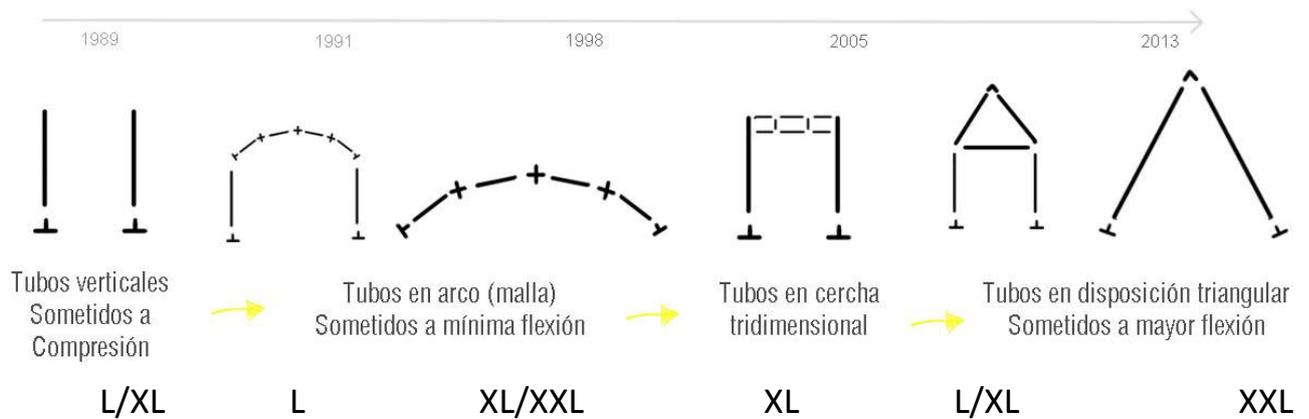


Figura 24. Esquema lógico de evolución técnica llevando al límite de escala y resistencia todo tipo de estructuras en tubos de cartón

re-emplazar los tubos. Las empresas locales no disponían de medios para manufacturar los tubos con el gran espesor requerido en los tubos de 20 m de longitud y 60 cm de diámetro, lo que provocó la necesidad de usar vigas metálicas en el interior de los tubos, trabajando estos en paralelo con estructura metálica interior.

5.3 Conclusión

La transición es clara; el desarrollo cronológico de estructuras de cartón sigue un orden lógico acorde con el aumento de escala, y por tanto complejidad de la estructura (figura 25). Shigeru Ban comienza a usar el cartón en el proyecto de Paper Arbor en 1989 usando de tubos de cartón verticales, haciéndolos funcionar a compresión pura. Cualquier pieza en cualquier estructura en cualquier material, trabaja mejor en la dirección principal de la misma, por tanto por lógica en sus primeros proyectos intenta transmitir las cargas hasta el suelo a lo largo de la pieza vertical principal portante, es decir, los tubos de cartón. La posibilidad de aumentar y desarrollar nuevas disposiciones de los tubos en una estructura, hace optar por complejizar la estructura y arriesgarse, haciendo trabajar a los tubos fuera de su zona de confort, para intentar investigar hasta dónde puede llegar este elemento prefabricado, como elemento portante e implícitamente como elemento integrante del diseño en sus edificios.

En su tercera obra en cartón, la Biblioteca para un poeta en Zushi en 1991, Shigeru Ban opta por disponer los tubos conectados mediante rótulas de madera en forma de arco creando una bóveda y con una mayor escala de arco en 1998 con el proyecto PaperDome (figura 23.2). Ambos son una manera lógica y no tan arriesgada de cubrir grandes luces, recordando a las antiguas bóvedas de masonería que por gravedad las piezas en piedra se encajaban entre sí formando la forma de arco. Más tarde como en el caso del pabellón de Singapur en 2006 (figura 23.3) resolvería grandes luces mediante cerchas compuestas por tubos dispuestos horizontal y verticalmente en una malla tridimensional, en una cercha los elementos tienden a trabajar en su dirección axial, trabajando también de manera optimizada. Este tipo de mallas tridimensionales a demás de formar bóvedas, o cerchas tridimensionales también se desarrollaron en forma de cúpula como el caso de Cardboard Dome en IJburg, Holanda en 2003, (figura 23.2) una cúpula que recuerda a la ya mencionada 'Geodesic Dome' de R.B. Fuller.

En 2005 la escala fue en aumento hasta escala XL, probando una disposición triangular entre tubos. Se llevó a cabo el proyecto de Nomadic Museum(figura 24.2) diseñado por Shigeru Ban junto al ingeniero Buro Happold, arriesgando más aún la función de la estructura de cartón; formada por un pórtico de dos columnas verticales, con una disposición triangular de tubos de cartón en la parte superior. La inclinación de los tubos en el triángulo hace que las fuerzas no fluyan de manera continua de tubo a tubo hasta el suelo como ocurría en el caso de los arcos, ya que los tubos eran elementos de menor longitud en proporción al arco que describían, habiendo menor distancia entre cada unión de tubos. Esta disposición triangular, en el Nomadic Museum no parece que tengan una función principalmente estructural, ya que en sus etapas de construcción se ve claramente que la cubierta se sostiene por ella misma sin los tubos de cartón. Esta disposición triangular se ha demostrado que funciona en escala M y L donde se han llegado a construir desde cabañas de emergencia, escuelas infantiles, y naves

atelier. Aún así se llevó más al límite con el proyecto en Nueva Zelanda, catedral de cartón en 2013 (figura 24.3), utilizando tubos de 20 m de altura con una inclinación que hacía dudar si verdaderamente el cartón por sí sólo podría soportar la flexión a esa escala, teniendo que utilizar cerchas metálicas interiores trabajando en paralelo para poder sostenerse.

Shigeru Ban lleva el material hasta el límite; conociendo su comportamiento ante diferentes esfuerzos, ayuda los tubos disponiéndolos de manera adecuada para hacer frente a situaciones de carga no idóneas. Todo ello, hace que el resultado de su investigación, sea un abanico de oportunidades para el cartón, teniendo un catálogo de opciones constructivas, donde el avance tecnológico de un material ha venido dado por su puesta a prueba fuera de su contexto habitual.

6. ¿UN MUNDO DE PAPEL?

La pregunta que mucha gente se hace es hasta dónde se puede llegar a usar el cartón. La idea de que todo objeto pudiese estar hecho de cartón, es ostentosa. El cartón se está introduciendo en muchos ámbitos poniéndose en contacto con la población más a menudo como objeto de valor: hay juguetes de cartón, hay sillas de cartón hay incluso lámparas de cartón, casas de diseño en cartón etc... pero ¿cuál es su límite de aceptación?

6.1 Límites

La aceptación del cartón a una escala humana, escala M, es debido a la cotidianeidad en la misma, no siendo prejuizado como lo sería en una escala mayor, escala XL, como por ejemplo una casa. Mucha de las personas a las que se les ha propuesto varias opciones de casas prefabricadas en distintos materiales, entre otros el cartón, nunca se han decantado por este material. Y muchas de las personas te responden con otra pregunta como '¿Por qué la necesidad de cambiar una casa de madera, o de estructura metálica, por una casa de cartón?'.

La familiaridad de este material en grandes escalas puede ser cuestión de tiempo. Hay una falta de conocimiento en la sociedad de la capacidad resistente de este material, por la tendencia a considerar un material económico como poco resistente y de poca calidad. Por ello la aplicación en la construcción implica una buena comercialización e investigación, que conlleva tiempo de desarrollo y adaptación en el sector industrial, y por tanto, dinero. ¿Es por ello esta inversión rentable para este tipo de construcción considerada generalmente temporal?

"A todos nos gustaría agrandar nuestras maquetas; aunque sea muy fácil hacer maquetas de papel de edificios, templos, palacios, pirámides o torres, esto es imposible de hacer de la misma manera a escala real"._ Mathilda McQuaid³⁶

Desde que se comenzó a analizar nuevas estructuras de cartón han surgido numerosas limitaciones técnicas, las cuales, como se ha observado en ejemplos anteriores, se han ido resolviendo en cada proyecto ejecutado, por el trabajo conjunto de ingenieros y arquitectos. Aun así, a pesar de solventar cualquier problema estructural, existen limitaciones por parte de la normativa actual en la construcción, ya que no contempla este tipo de edificaciones en papel. Por ello la mayoría de los proyectos en cartón, como en el caso del Madrid PaperPavilion³⁷ de Shigeru Ban, se consideran como edificios temporales, pudiendo permanecer un tiempo limitado contruidos, ya que la norma en este tipo de edificaciones es menos estricta. Por ello, sería necesario adaptar la norma para que puedan considerarse como edificios permanentes dentro de ciclo de vida más acotado que por ejemplo un edificio en hormigón.

³⁶ Ver McQuaid ,Mathilda: *Shigeru Ban* , Phaidon, NY, 2003. Pg 4

³⁷ Ver IE, School of Architecture and design: Presentación del pabellón *Madrid Paper Pavilion* de Shigeru Ban, Madrid, España, Abril 2013

Aunque la durabilidad de proyectos contruidos con papel sea menor, se compensa con la posibilidad de reciclaje del mismo. Lo que invita a reflexionar sobre qué porcentaje de nuevas construcciones deben ser temporales y por ello ser altamente reciclables; y que porcentaje de nuevas construcciones se deben considerar permanentes y que no sean reciclables o sí (en un caso ideal). Sería interesante poder clasificar que tipo de usos podría albergar un edificio en cartón. Por el momento aún no se han construido edificios de varias plantas por lo que limitaría el uso de este material por ejemplo para vivienda colectiva. Pero sí ha dado fruto este material en construcciones de uso público como escuelas teatros e incluso iglesias.

6.2 Posibilidades y Futuro

Los diferentes tipos de cartón que se han investigado y estandarizado han permitido el desarrollado de piezas con gran capacidad resistente, teniendo oportunidad de ser sometidas a esfuerzos de menor a mayor escala. Desde el cartón corrugado, pasando por el cartón alveolar hexagonal y finalmente los tubos de cartón, hemos visto que todos ellos han llegado a formar parte como elemento constructivo portante de grandes estructuras.

El cartón corrugado es el cartón básico, y es el que hasta hoy aún no ha llegado a desarrollarse como estructura principal en un proyecto real a escala XL, quedándose en prototipo como vimos en ejemplos de vivienda temporal (figura 13), de un proyecto de graduación de estudiantes en 1976 entre otros más actuales como 'Paper Parasite' de Jop van Buchem en 2004 (figura 26.2), 'Paper building' de Monique Verhoef en 2002 (figura 26.4) y 'Carboard house' de Stutchbury & Pape en 2005 (figura 26.1), que no se han llegado a estandarizar, por dificultades en el diseño o construcción, entre seguramente otras variables.

Sí es cierto que el cartón corrugado tiene muchas posibilidades de formar parte del edificio como elementos secundarios como tabiques interiores, exteriores o como bandeja de instalaciones, además de ser un material desde sus inicios ya utilizado para mobiliario, como hemos ido viendo.

Las placas alveolares siendo de parecidas características físicas, pero teniendo capacidades mecánicas diferentes, siendo mucho más resistente, ha podido alcanzar la escala XL, como el caso del museo de arte para niños de Nemunoki en 1999. Sus aplicaciones a menor escala también son viables, tanto atendiendo a aspectos resistentes o aspectos aislantes para tabiques interior o incluso muros estructurales, además de ser estéticamente más interesante por la forma alveolar hexagonal interior, utilizándolo por ejemplo para crear un espacio interior de oficina de la empresa de diseño Scherpontwerp en Eindhoven por Ad Kil en Ro Koster en 2005 (figura 26.3).

Aunque haya muchas posibilidades para ambos tipos de cartón, la manufactura de ambos tipos de piezas es mucho más complicada, que si comparamos con la manufactura del un tubo de cartón. Otro inconveniente es la dificultad de unir (mediante piezas de nexos o incluso adhesivos) diferentes planos de cartón ya que tiene que cumplir exigencias estructurales, aislantes, estanqueidad frente al agua... y a demás todo ello junto a un cierto rigor estético. De ahí que no sea casual el uso de tubos por parte de Shigeru Ban, que acepta la geometría tubular como la más eficiente en términos de manufactura, estructurales y económicos; y por

dicha aceptación condiciona la estética de sus edificios, resolviéndolos con una lógica constructiva, con la agilidad de utilizar esta geometría impuesta como inspiración y argumento de su arquitectura.

Algo que afecta a todas estas piezas estandarizadas en cartón es la estanqueidad frente a su amigo-enemigo, el agua. Si es cierto que el agua es necesaria para la producción de papel. El inconveniente surge a la hora de exponer ya las piezas prefabricada en cartón a la intemperie, por ello se usan diferentes cubriciones; tanto barnices, como láminas plastificadas, o dobles fachadas no estructurales de policarbonato... evitando el cambio de geometría y por tanto de propiedades mecánicas que el material sufriría al mojarse y por tanto llegar al colapso del edificio.

El reto existente es hacer cumplir a estos elementos en cartón la normativa existente y si pueden ser realmente competitivos respecto a otros materiales más comunes en la industria de la construcción, atendiendo a aspecto como: aislamiento, acústica, resistencia al fuego,... Muchos de los proyectos vistos se han sometido a estos tipos de pruebas; como por ejemplo el pabellón de TUDelft, o el pabellón de Hannover de Shigeru Ban + Frei Otto, en 2001. En términos acústicos el cartón al ser poroso absorbe el ruido de manera satisfactoria habiendo llegado a utilizar tubos de cartón como barreras acústicas en autopistas en el proyecto 'The wall' de Fons Verheijen , autopista A2 de Utrecht, en 2005(figura 26.5).

	S	M	L	XL	XXL
Cartón Corrugado	*	*	... Loading		
Cartón alveolar	*	*	*	*	...Loading
Tubos de cartón	*	*	*	*	...Loading

Tabla 1. Escalas alcanzadas por diferentes tipos de cartón

Después de todo el análisis de estructuras en cartón, hemos visto que estas estructuras en papel funcionan en distintas escalas y contextos y en gran medida cuando son estructuras de tubos. Pero, a la hora de construir edificios no sólo se analizan aspectos técnicos, estructurales o estéticos si no que se debe analizar la rentabilidad de los mismos. Esto se mide entre variables como la durabilidad y el coste, entre otros. Un edificio es rentable cuando su valor se reembolsado, en un tiempo igual o menor al de su ciclo de vida.

La arquitectura de elementos prefabricados ahorra en costes: El período de montaje implica menos mano de obra y tiempo, y la posibilidad desmontaje una vez finalizado su ciclo de vida, hace recuperable las piezas. En este sentido ya hay materiales que completan este ciclo rentabilizando en coste; Pero el papel al ser aún más ligero y aún más barato, puede incluso no sólo ser rentable sino también crear ganancias y no sólo económicas sino también ambientales. De esta manera la tendencia y necesidad social actual de sostenibilidad además de su mínimo coste podría tener como resultado la aceptación de este material como posible sustituto de otro a la hora de proyectar edificios en un futuro próximo.

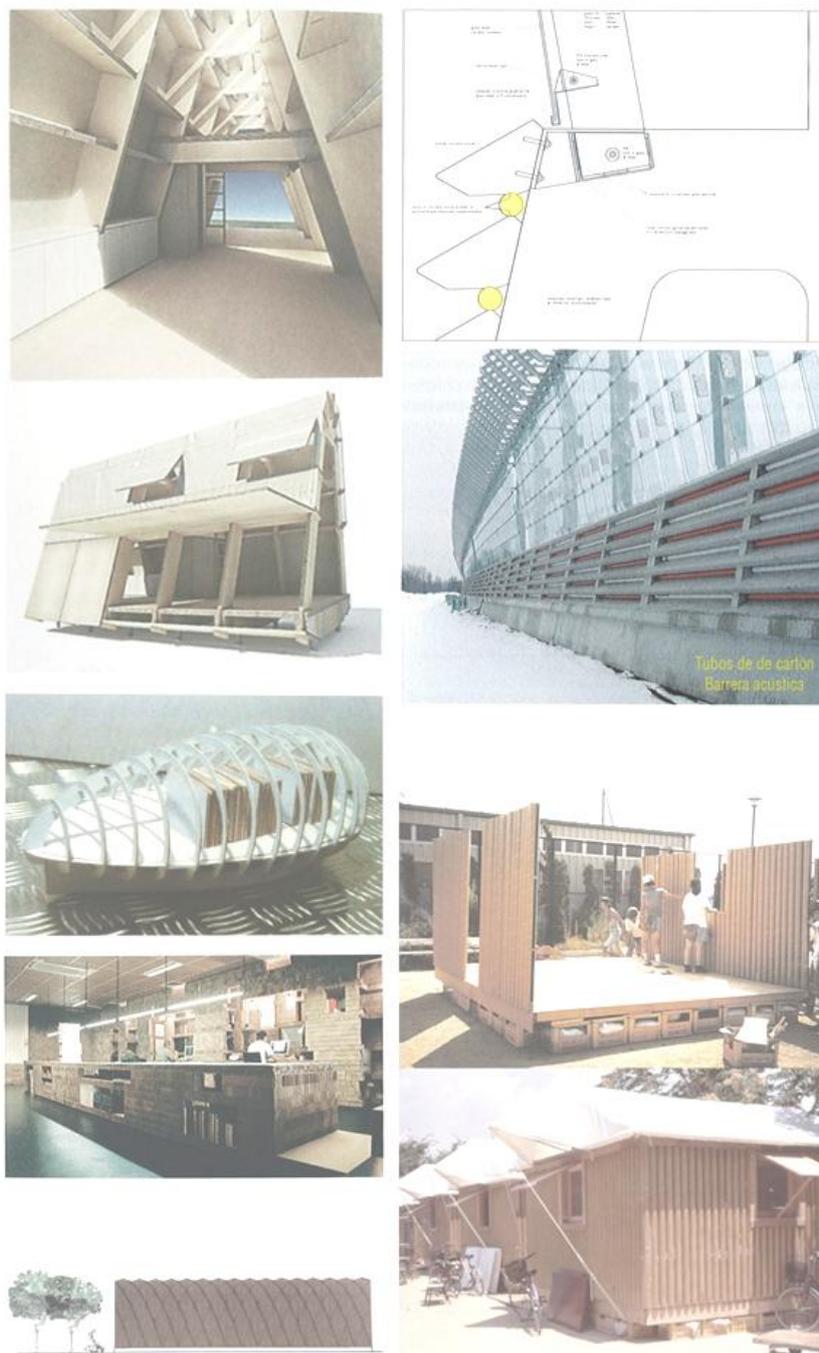


Figura 26 de arriba a abajo y de Izq. a Drch. [26.1] 'Carboard house' de Stutchbury & Pape, Houses of the future exhibition, Sydney, 2005 [26.2] 'Paper Parasite' de Jop van Buchem en 2004 [26.3] Oficina de la empresa de diseño Scherpontwerp, Ad Kil en Ro Koster, Eindhoven, 2005. [26.4] 'Paper building' de Monique Verhoef en 2002 [26.5] 'The wall', Barrera acústica en autopista, Fons Verheijen , Utrecht, 2005 [26.6] Paper Log-house-Kobe,Japón, Shigeru Ban, 1995

Hacer una buena relación entre estas variables técnicas y la variable tiempo entre los distintos materiales, permitiría el consumo responsable de estos materiales según el tipo de edificio a construir (e.i: si es un edificio público es necesario que sea permanente, aconsejando material de mayor durabilidad; y si es una vivienda unifamiliar puede ser temporal, aconsejando materiales menos durables como el cartón).

Pero, ¿Es esto viable a gran escala dentro de un colectivo en el que desde sus orígenes, ha intentado marcar su huella en la historia mediante construcciones perpetuas? En la sociedad actual la durabilidad es algo que nos preocupa. La espera de saber a ciencia cierta el comportamiento de estos edificios a lo largo del tiempo, llevarán a las próximas generaciones a confiar en este tipo de construcciones en papel.

Temporal³⁸: 4. adj. *Que pasa con el tiempo, que no es eterno.*

Permanecer³⁹: 1. intr. *Mantenerse sin mutación en un mismo lugar, estado o calidad.*

Shigeru Ban no establece un límite claro entre lo temporal y lo permanente, considerando permanente todo aquello que las personas aceptan y desean hacer que permanezca. El buen funcionamiento, uso y la buena conservación, hace que no solo edificios de cartón sino cualquier tipo de edificio sea permanente; Y más aún cuando estas construcciones son verdaderamente una necesidad en ciertas zonas del mundo refiriéndose a ejemplos como las casas de emergencia o la Iglesia en Kobe (figura 26.6). En este caso, hablamos de una arquitectura de emergencia, lo que hace lógico afirmar que una casa diseñada por Shigeru Ban, económica, fácil de ensamblar, ligera, resistente, capaz de soportar terremotos sea mucho mejor que una de las casas destruidas por un terremoto. Lo cierto es que el uso del papel para la construcción, en zonas sísmicas no es casual, siendo un material que se ha utilizado para particiones interior en países como Japón (papel shoji) desde antiguo, pudiendo hacer frente a estos terremotos debido a su flexibilidad y resistencia. La posibilidad de aplicar arquitectura de cartón para casos de emergencia, sigue una reflexión lógica de variables necesarias en estos casos como: la facilidad y rapidez de ensamblaje, la ligereza para su transporte y su accesibilidad y bajo coste. Sin embargo para arquitectura en el medio urbano contemporáneo responde a otras variables, como el diseño, la innovación, la necesidad o tendencia de ser sostenible (reciclable). El objetivo es por tanto diferente, por ello, es necesario intentar que ambos sean capaz de convivir, evitando que la excesiva demanda de uno, no entorpezca el desarrollo del otro. Aparte de todo el diseño y el avance tecnológico sobre este material, es cierto que la reciclabilidad, la economía y la ligereza para su transporte, son características que son cada vez más demandas por la población en grandes urbes hoy en día, debido a movimientos y tendencias sostenibles actuales. El ampliar el uso de este material en un sector como el de la construcción, provoca un riesgo de exceso de demanda, lo cual aumentaría su valor económico, disminuyendo su accesibilidad.

³⁸ Ver RAE: *Temporal*, definición, consultado en línea: <http://lema.rae.es/drae/?val=permanente>

³⁹ Ver RAE: *Permanecer*, definición, consultado en línea: <http://lema.rae.es/drae/?val=permanente>

subject	material	positive	→	negative
weight	cardboard	██████████		██████████
weight	wood	██████████		██████████
weight	sand-lime stone	██████████		██████████
exhaustion	cardboard	██████████		██████████
exhaustion	wood	██████████		██████████
exhaustion	sand-lime stone	██████████		██████████
energy content	cardboard	██████████		██████████
energy content	wood	██████████		██████████
energy content	sand-lime stone	██████████		██████████
emissions	cardboard	██████████		██████████
emissions	wood	██████████		██████████
emissions	sand-lime stone	██████████		██████████
use of water	cardboard	██████████		██████████
use of water	wood	██████████		██████████
use of water	sand-lime stone	██████████		██████████
recycling	cardboard	██████████		██████████
recycling	wood	██████████		██████████
recycling	sand-lime stone	██████████		██████████
disassembly	cardboard	██████████		██████████
disassembly	wood	██████████		██████████
disassembly	sand-lime stone	██████████		██████████
waste	cardboard	██████████		██████████
waste	wood	██████████		██████████
waste	sand-lime stone	██████████		██████████

Figura 27 Tabla de aspectos negativos y positivos de particiones interiores de estos materiales por m2 de pared. Pg 128, *Cardboard in architecture*, M Eekhout et al., IOS Press, 2008



Figura 28 Madera 'Kranthout', Mieke Meijer+Vij5

La industria del papel mueve un gran porcentaje de la industria general actual. Ampliar el ámbito de uso del cartón es ampliar el ámbito de uso del papel, lo que implicaría más materia prima, es decir, árboles. Aquí la cuestión, es si es necesaria crear una industria solamente para el cartón en la construcción.

Su posibilidad de reciclaje es su mayor ventaja; por ello, la posibilidad de recuperación del cartón que actualmente ya ha iniciado su ciclo de vida es el más idóneo para iniciar la adaptación de el cartón en la construcción, que podría también combinarse con la nueva producción de cartón de manera que el inicio de la adaptación a la industria no genere demasiado impacto, y que una vez integrado en la industria de la construcción, se llegase a un equilibrio entre el producido a partir del reciclado y el producido a partir de la materia, intentado que el producido a partir de materia prima no superase al reciclado.

La investigación y comparación atendiendo a aspectos estructurales, técnicos y de durabilidad, entre materiales existentes en la construcción y el papel sería útil para saber el nivel de competitividad que tendría el cartón en este sector. (e.i. evaluar y comparar los materiales en función de: la resistencia (tabla 2), el peso, y su coste relacionándolo con su sostenibilidad, es decir, cuanto desecho ocasiona el uso de un determinado material (figura 27)). Como podemos observar en la tabla2. el papel resiste de dos a diez veces más tracción (en el peor de los casos) que el hormigón, pudiendo llegar hasta veinte veces más. Y sorprendentemente solo el hormigón supera el doble al papel a compresión. Por tanto las posibilidades de sacar partido a este material en términos resistentes son muy altas.

	Papel (1050 g/m ²)	Acero(E235)	Hormigón	Madera
Compresión (MPa)	(dirección de la fibra) 5-10	360	20	(dirección de la fibra) 30-50
	(dirección perpendicular a la fibra) 2-5			(dirección perpendicular a la fibra) 4-7
Tracción (MPa)	(dirección de la fibra) 15-45	360	2,2	(dirección de la fibra) 30-80
	(dirección perpendicular a la fibra) 5-20			(dirección perpendicular a la fibra) 1-3

Tabla 2 Tabla comparativa de resistencias de materiales: Referencia datos; Julia Schönwälder, Jan Rots, *Cardboard in architecture*, IOS Press, 2008, pg 139

Es interesante poder comparar el ratio de altura/Luz de vigas en distintos materiales. La posibilidad de incluir vigas de cartón en este tipo de ratios ayudaría a familiarizarse con este material tomándolo en consideración a la hora de materializar la estructura en un proyecto (tabla 3).

	Papel	Acero	Hormigón	Madera
Ratio general altura/Luz	¿?	1/10-1/30	1/20	1/20-1/30
h/L para (5 KN/m) * Prototipo viga2 TUDelft(30x15x400)	1/13,3			

Tabla 3 Tabla comparativa de ratio altura/Luz de vigas en distintos materiales: Referencias Elise Van dooren, Taco van Iersel, pg 76-77 y Julia Schönwälder ,Jan Rots pg 141-142, Cardboard in architecture, IOS Press, 2008

Elise van Dooren y Taco van Iersel después de analizar muchos de los prototipos de vigas en cartón, se observa que el papel es capaz de soportar cierta cantidad de carga salvando luces. El ratio medio altura/Luz para vigas en cartón es de 1/10 e incluso pudiendo llegar a 1/20 siendo el límite, pudiendo someterla a una excesiva flexión, haciéndola colapsar, y en algunos casos colapsar sin previa deformación (rotura frágil). Por ello, en la mayoría de los casos existentes se han utilizado el cartón para soportar cubiertas, teniendo menor sometimiento de cargas que en forjados. Además de introducir y adaptar aspectos técnicos del nuevo material en la normativa actual existe una necesidad de establecer una estrategia de desarrollo comercial, es vital para que un material como el papel genere confianza y tenga futuro en la construcción. Algunos de los proyectos en papel existentes como la escuela infantil de Buro Happold en 2013, han desarrollado estrategias de concienciación social, que hacen formar parte del proyecto a la población, animando la a reciclar el papel, para minimizar costes y poder manufacturar los elementos constructivos en cartón con material local reciclado.

Actualmente de la investigación y de este intercambio entre los diferentes agentes involucrados (entre la industria, ingenieros, arquitectos y diseñadores y consumidores), ya han surgido frutos llegando ,además de estas estrategias de concienciación, a nuevas técnicas de procesado del papel, dando la vuelta al ciclo del reciclado: es el caso de la madera denominada 'Kranthout', desarrollada por Mieke Meijer, (figura 28) que ha conseguido crear madera a partir de papel de periódico: Cuando antes la lógica y la práctica definían al cartón como derivado del papel y al papel como derivado de la madera, se empieza a reinvertir el ciclo consiguiendo que madera, sea uno de los derivados del papel.

El desarrollo e innovación de un objeto o material no atraviesa un proceso lineal de un extremo a otro, si no que atraviesan ciclos el cual se puede reinvertir, para volver a replantearse ideas y de esta manera poder reajustar variables, para volver a plantearse las mismas preguntas. Por tanto, nos volvemos a preguntar ¿Cuál es el límite ahora?

BIBLIOGRAFÍA

MCQUAID, Mathilda. Shigeru Ban. 1ª edición. Phaidon Press Limited, NY, 2003. ISBN0714841943

EKHOUT Mick, et al. Cardboard in architecture: Research in Architectural Engineering Series. Volume 7. IOS Press, 2008, Netherlands. ISBN9781586038205

CORRUGANDO. II Fascículo Manual de elaboración de cartón corrugado. [en línea] 8ª edición. Artículo 2. In: Revista Oficial ACCCSA Disponible en: http://www.corrugando.com/index.php?option=com_content&view=article&id=306:ii-fasciculo-manual-de-elaboracion-del-carton-ondulado-materias-primas-en-la-elaboracion-del-carton-corrugado-2&catid=29:edicion-8&Itemid=18 (consultado el 08.07.2014).

TWEDE Diana, E.M SELKE Susan. Cartons, Crates and Corrugated Board: Handbook of Paper and Wood Packaging Technology. DEStech Publications, Inc, USA, 2005. ISBN1932078428

STURGESS Danya. An Architecture of Disassembly and Cyclical material life. Thesis in Architectural Science. University of Waterloo, 2012.

CARTONLAB. Exposición Forest in the World. <http://cartonlab.com/2014/04/11/cartonlab-exposicion-forest-in-the-world/> (consultado el 10.07.2014)

SHIGERU BAN ARCHITECTS. Paper Tube Structure. Works [en línea] Disponible en: <http://www.shigerubanarchitects.com/works.html> (consultado el 23.04.2014)

INDA. Pin's Case Study. Shigeru Ban's Paper Log House. 2013 [en línea] Disponible en: http://indayear2studio-1314s1.blogspot.fr/2013/09/pins-case-study-shigeru-bans-paper-log.html#.U_YfLPI_vhe (consultado en 14.07.2014)

INDUSTRIA PAPELERA. Importancia económica de la industria papelera, 2011 [en línea] Disponible en: <http://inpapelera.blogspot.fr/> (consultado el 09.07.2014)

DESENFRENO. Proyecto Valla Faro. 2012. [en línea] Disponible en: <http://www.desenfreno.es/index.php?/fibart/fib-2012/> (consultado el 16.05.2014)

BUCKMINSTER FULLER R. Biography. About Fuller. Buckminster Fuller Institute [en línea] Disponible en: <http://bfi.org/about-fuller/biography> (consultado el 21.04.2014)

QUINTANS C. Traslado de casas.6 . 2012 [en línea] Disponible en: <http://tectonicablog.com/?p=48544>

EP 0627306 A1. Enhanced crush strength construction multi-grade paperboard tubes. In: IFI CLAIMS Patent Service, 2012. [en línea] Disponible en: <http://www.google.st/patents/EP0627306A1?cl=en> (consultado el 09.05.2014)

ACOSTA, R. Noticias de navarra. Prefabricados. 2011 [en línea] Disponible en: <http://www.noticiasdenavarra.com/2011/02/21/sociedad/navarra/se-imponen-los-edificios-prefabricados-que-minimizan-costes-y-permiten-mayor-rapidez> (consultado el 19.04.2014)

HAMILTON, Janet. Korean style. Origami Sightings. 2009. [en línea) Disponible en:
http://koreanstyle.tk/Origami_Sightings_-_Architecture_and_Design (consultado el
11.07.2014)

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Escala XL; escala de edificios o superior	17
Figura 2. Escala L; escala de unidades habitacionales.	18
Figura 3. Escala M; escala humana.	19
Figura 4. Escala S; escala del material.....	20
Figura 5. Innovaciones sobre el cartón en sus orígenes.	26
Figura 6. Proceso de hinchamiento de fibra en el papel	28
Figura 7. Curvas tensión-deformada de una lámina de cartón. Tesis doctoral Julia Schönwälder.....	29
Figura 8. Propiedades físicas del cartón corrugado	31
Figura 9. Analogía de viga celosía en cartón corrugado	31
Figura 10. [10.1] <i>Fodable seat</i> , A.W. Rowe, 1937. [10.2] <i>House of cards</i> , Eames, Charles & Ray, 1952. [10.3] <i>Wiggle chair, Easy edge</i> ; Gehry, Frank, 1972 [10.4] <i>Zimoun + Hannes Zweifel exhibition</i> , 2011. [10.5] <i>Zimoun exhibition</i> , 2012. [10.6] <i>Zimoun exhibition</i> , 2013.....	33
Figura 11. [11.1] Caso de estudio-1TUDelft, Taco-Dozen. [11.2] Caso de estudio-2 TUDelft, Taco van Iersel. [11.3] Soporte para cableados eléctricos. Proyecto 4.5.3 TUDelft, Taco Van Iersel. [10.4] Prototipo Viga-1 TuDelft, Julia Schönwälder [10.5] Prototipo Viga-2 TUDelft, Julia Schönwälder.....	35
Figura 13 Vivienda temporal, proyecto de graduación Chiel van Stelt, Hans Mesman y Wim Kahmann, 1976, pg 33 del libro <i>Cardboard in Architecture</i> , M. Eekhout, IOS Press, 2008	37
Figura 12 [12.1] Tipos de onda de cartón corrugado estandarizados. [12.2] Referencia a la figura anterior 11.4. [12.3] Referencia a la figura anterior 11.5.	37
Figura 14. Paneles de cartón alveolar sometidos a flexión.....	39
Figura 15. Propiedades del cartón alveolar hexagonal.....	39
Figura 16. [16.1] <i>Nemunoki childrens art museum</i> , Shizuoka, Japan, Shigeru Ban, 1999. [16.2] Prototipo viga-3, cartón alveolar, TUDelft, Julia Schönwälder, 2004 [16.3] Prototipo viga 4, cartón alveolar, TUDelft, Julia Schönwälder, 2004	41
Figura 17 [17.1] Proyecto 4.2.6 TUDelft, Maria den Boon, 2004. [17.2] <i>Cardboard Pavilion</i> , Facultad de arquitectura TUDelft, 2006. [17.3] <i>Exhibición "Trial and Error"</i> , <i>Building centre trust</i> , Magma architecture, London	43
Figura 18. Manufactura de tubos de cartón. EP 0627306 A1. IFI CLAIMS Patent Service, 2012	45
Figura 19. Esquema comparativo entre sección cuadrada (pilar) y sección circular (columna) en cartón	45
Figura 20. Imágenes de McQuaid ,Mathilda: <i>Shigeru Ban</i> , Phaidon, NY, 2003, pg234-237, completada	47
Figura 21. [21.1] Paper Arbor,Aichi, Japón, Shigeru Ban, 1989. [21.2]Paper house. Paper tube structure 05,Shigeru Ban, Yamanashi, Japón, 1994. [21.3] Miyake Design Studio Gallery, Paper tube structure 06,Shigeru Ban, Shibuya, Japón, 1994. [21.4] Paper Church, paper tube structure 08, Shigeru ban, Kobe, Japón, 1995.	49
Figura 22. [22.1]Library of a Poet, Paper structure 04, Shigeru Ban, Kanagawa, Japón, 1990 [22.2]Paper Dome, Paper Structure 09, Shigeru Ban, Masuda, Gifu, Japón, 1998.....	51

Figura 23. [23.1] Moma exhibition Paper Arch, Shigeru Ban, New York, 2001 [23.2] Paper Dome, Shigeru Ban, Ijburg, Holanda, 2003 [23.3]Singapore Biennale Pavilion , Shigeru Ban , Singapore, 2006.....	53
Figura 24. Esquema lógico de evolución técnica llevando al límite de escala y resistencia todo tipo de estructuras en tubos de cartón.....	55
Figura 25 Disposición triangulada de tubos en cartón en orden de escala. [24.1] L . Paper Atelier, Onagawa, Japón, 2011 [24.2] XL. Nomadic Museum, Nueva York, 2005 [24.3] XXL. Card board Cathedral, Nueva Zelanda, 2013.....	55
Figura 26 de arriba a abajo y de Izq. a Drch. [26.1] ‘Carboard house’ de Stutchbury & Pape , House of the future exhibition, Sydney, 2005 [26.2] ‘Paper Parasite’ de Jop van Buchem en 2004 [26.3] Oficina de la empresa de diseño Scherpontwerp, Ad Kil en Ro Koster, Eindhoven, 2005. [26.4] ‘Paper building’ de Monique Verhoef en 2002 [26.5] ‘The wall’, Barrera acústica en autopista, Fons Verheijen , Utrecht, 2005 [26.6] Paper Log-house-Kobe,Japón, Shigeru Ban, 1995.....	61
Figura 27 Tabla de aspectos negativos y positivos de particiones interiores de estos materiales por m2 de pared. Pg 128, <i>Cardboard in architecture</i> , M Eekhout et al., IOS Press, 2008	63
Figura 28 Madera ‘Kranthout’, Mieke Meijer+Vij5	63

TABLA DE TABLAS

Tabla 1. Escalas alcanzadas por diferentes tipos de cartón.....	60
Tabla 2. Tabla comparativa de resistencias de materiales: Referencia datos; Julia Schönwälder, Jan Rots, <i>Cardboard in architecture</i> , IOS Press, 2008, pg 139	64
Tabla 3. Tabla comparativa de ratio altura/Luz de vigas en distintos materiales: Referencias Elise Van dooren, Taco van Iersel,pg 76-77 y Julia Schönwälder ,Jan Rots pg 141-142, <i>Cardboard in architecture</i> , IOS Press, 2008	65

ANEXO

ANEXO