

Estructuras de Plástico



Grado en Fundamentos de la Arquitectura

Trabajo Fin de Grado

Autor:

Adrián Llopis Vidal

Tutor:

Antonio Maciá Mateu

Julio 2020



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	5
MATERIALIDAD Y CAPACIDADES DEL PLÁSTICO	
Polímeros y Tipologías	9
Propiedades de los Plásticos	15
PROBLEMAS DE RIGIDEZ	
Limitaciones	25
MÉTODOS DE RIGIDIZACIÓN	
Estructuras nervadas	31
Estructuras traccionadas	40
Estructuras transformables	49
Estructuras horadadas	58
PROPUESTA DE DISEÑO ESTRUCTURAL	
Programa	67
Modelización	70
Cálculos	75
CONCLUSIONES	83
BIBLIOGRAFÍA	85
ANEXOS	
Catálogo de obras	91
Tabla de propiedades de los plásticos	92

“Los materiales plásticos ahora pueden dar voz a un estilo biológico. La arquitectura plástica es la arquitectura de la vida.”

Ionel Schein (1956)

INTRODUCCIÓN

Uno de los mayores avances, sino el mayor, dentro del campo de la arquitectura estructural debe ser en primer lugar el cálculo científico en sí, la implementación de las matemáticas y la física a la arquitectura. Con ello aprendimos a mejorar nuestra forma de construir, de entender por qué las construcciones no se caían y a confirmar la validez de aquellos diseños estructurales que ya dábamos como adecuados. Tras este cambio de paradigma, de lo empírico a lo analítico, cada avance en las estructuras venía dado por el material con el que se construían. Pero no únicamente la materialidad *per se* aumentaba el grado de conocimiento, más bien cada materialidad exigía paralelamente desarrollar un diseño estructural que adaptara sus propiedades.

Ha ocurrido con la piedra, el acero, el vidrio, la tela y el hormigón. Cada uno de ellos ha significado un antes y un después en la arquitectura y la forma de construir. Hoy en día se siguen descubriendo nuevos materiales que estamos pudiendo implementar en nuestros diseños y no se vaticina que esto vaya a acabar aquí. Pero en el caso que nos ocupa vamos a hablar de los plásticos, que pese a haber representado un cambio en la producción y la industria de todo el mundo, no se implementó en la arquitectura como para llegar a destacar. Es uno de los grandes olvidados del siglo pasado que prometía mucho pero que a los arquitectos no les despertó el suficiente interés como para considerarlo una herramienta.

A día de hoy se conoce muy bien cuáles son las cualidades básicas del plástico y sus derivados; ello nos ha dado una mayor consciencia y ha repercutido peyorativamente en la percepción que tenemos de él. Si en su momento no se valoró como material estructural, ahora no es posible concebir su validación para nuevos campos dentro de la industria. Podría parecer ir en contra de los principios eco-sostenibles que tanto han arraigado en la conciencia colectiva pero cabe contextualizar: si no hay nada que deba ser más duradero que un edificio (o su estructura mismamente), ¿no debería estar constituido por materia que perdure toda su vida útil?.

Más allá de estas cuestiones, sí hemos podido ver pinceladas de lo que este material puede ofrecer en la arquitectura; incluso tuvo su propio movimiento a medias tintas impulsado por arquitectos finlandeses de la época de los 60s. Se destacará “La Casa del Futuro” de Matti Suuronen, un concepto que era el principal motor para la construcción con elementos plásticos y que culminó con varios diseños; entre ellos el Venturo. Por otra parte, en su mayoría este material se sigue utilizando para crear arquitecturas efímeras y funcionalmente limitadas. Estos diseños serán objeto de estudio en el presente trabajo y se usarán, en cuyo caso, para ejemplificar la forma en que se pueden conseguir resultados estructurales pragmáticos.



01. FUTURE HOUSE



02. BAN' PAVILION

Para abordar el trabajo, primeramente se procederá a la descripción de la concepción de los plásticos: sus características, particularidades y propiedades, a partir de las cuales se pueden establecer las ventajas y desventajas sobre el uso de susodicho material. Casi se tratará de un ensayo físico donde para contextualizar los datos se compararán con las propiedades de los materiales más comunes en la construcción. Cabe mencionar que existen diversos tipos de plásticos por que para cada variedad se le podrá adjudicar una estrategia de diseño estructural diferente; ello nos llevará al siguiente apartado del trabajo.

Llegados aquí ya tendremos un punto de partida para introducirnos en el ámbito arquitectural, donde será vital aprovechar las cualidades idóneas para que los elementos plásticos sean portantes y aptos para el servicio. Con la ayuda de los ejemplos, comentados anteriormente, seguiremos profundizando en la aplicación del plástico a la arquitectura.

Cada obra o grupo de obras contará consigo con una tipología estructural diferenciada, en la que dependiendo de la forma en que el plástico esté rigidizado, conformará o conformarán una categoría; pudiéndose categorizar hasta cuatro tipologías según el método de rigidización. Estas son:

Estructuras nervadas

Estructuras transformables

Estructuras traccionadas

Estructuras horadadas

Tras hablar de las carencias que puedan padecer estas estructuras y de qué forma se pueden solucionar, finalmente se ahondará en una solución constructiva propia. Nos declinaremos por una tipología estructural dentro de las cuatro categorías analizadas, e implementaremos un programa concreto. La finalidad de este apartado es hacer las veces de conclusión, dejando como entendido los conceptos a partir de los que se ha hecho el estudio y aportando nuevas soluciones.

Como último matiz antes de empezar con el análisis del material hay que aclarar que la intención de este trabajo no es validar el uso de plásticos en la arquitectura; más bien pretende hacer evidentes las cualidades que tuvieran en una estructura.

MATERIALIDAD Y CAPACIDADES DEL PLÁSTICO

Polímeros y Tipologías

Aunque pueda parecer algo relativamente moderno, el plástico hizo su aparición en la historia a mediados del siglo XIX. Su invención data concretamente del 1860 cuando en la búsqueda por un sustituto al marfil, John Hyatt disolvió celulosa en una solución de etanol y alcanfor; este primer compuesto tuvo el nombre de celuloide. Lo cierto es que se llevaba utilizando productos plásticos años atrás, pero su concepción aun no se había formado.

La base de este material provenía de polímeros naturales como la celulosa o el caucho, pero a medida que se fue utilizando, se modernizó su producción y se pudo sintetizar. En consecuencia, la producción de los polímeros dependía de su material de origen: naturales (que ya existen en la naturaleza), artificiales (que se obtienen a partir de procesos industriales para modificar los polímeros) y por último los sintéticos (que se sirven de transformaciones químicas para formar un nuevo compuesto).

Los materiales sintéticos tienen moléculas de gran longitud a las que se les llama monómeros (dos átomos de carbono con cuatro de hidrógeno) y su sucesiva unión deriva en un polímero. Sacamos en claro que los polímeros son compuestos orgánicos que además en su mayoría son derivados del petróleo. Las largas cadenas lineales de polímeros son la razón por la que el plástico puede llegar a comportarse como un textil y tener espesores extremadamente finos sin ser frágil. La producción de plástico sin embargo estuvo potenciada por otras propiedades que lo hacían apto para el consumo, sobretodo por su resistencia a agentes bióticos, ser inerte químicamente y su capacidad para ser fácilmente moldeable.

Como decíamos, una pieza de polímero se consigue a través de procesos termo-químicos, pues a ciertas temperaturas y presiones, el plástico se funde y se vuelve lo suficientemente fluido como para ser maleable. Pero no todos son igual de sensibles al calor ni reaccionan de la misma manera una vez enfriados. Debido a esto se pueden clasificar en tres sub-categorías: termoplásticos, termoestables y elastómeros.

Los termoplásticos se deforman con el calor y se solidifican al enfriarse. La gran virtud de estos es que se pueden continuar sometiendo a estas transformaciones térmicas sin perder sus propiedades y son reutilizables. Sus polímeros orgánicos están constituidos por largas macromoléculas de donde crecen otras más pequeñas, concadenadas de forma débil. Cada termoplástico presenta diversas propiedades pero los más usados en la construcción son:

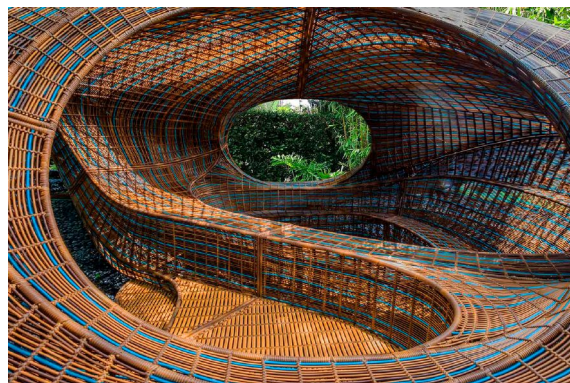
- PVC o Policloruro de vinilo. Es una resina sintética obtenida por la polimerización de cloruro de vinilo. Es un material impermeable, de gran dureza y resistente a los ácidos y a los álcalis. Se suele utilizar comúnmente para tuberías, drenajes, perfilerías de carpintería incluso en pavimentos.
- PS o Poliestireno. Puede sintetizarse en su forma de baja densidad o como una placa rígida de alta densidad. Este poliestireno duro no es granulado ni esponjoso, más bien compacto y transparente. En arquitectura el poliestireno expandido se suele utilizar como material de relleno, aislamiento acústico o térmico.
- PE o Polietileno. Uno de los más sencillos y baratos de fabricar. Suele extruirse para hacer fibras o soplarse para formar películas delgadas. Se produce en diferentes densidades para aislamientos eléctricos, tuberías o láminas impermeables.



03. OLYMPIC SHOOTING VENUE



04. PS EXACTA SOLUTION



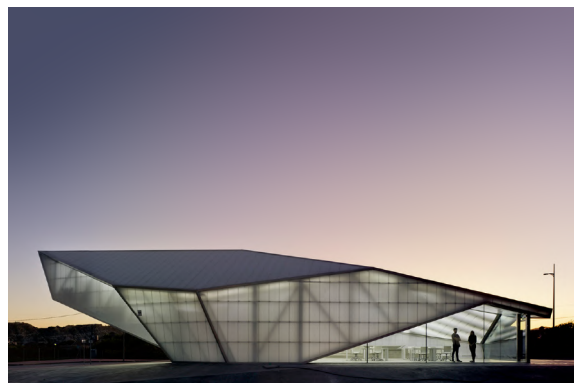
05. ELLIPSICOON

- PMMA o Metacrilato. Es un material con muy buena aceptación por su dureza y resistencia al intemperie. Suele compararse con el vidrio al ser igual de transparente pero se diferencia por tener menor peso y fragilidad, además de ser más fácilmente moldeable como cualquier polímero.



06. FEDA - CONFEDERACIÓN DE EMPRESARIOS DE ALBACETE

- PC o Policarbonato. Muy similar al metacrilato. Se produce en forma de placas semitransparentes usadas normalmente como lucernarios o ventanas. También destaca por su poco peso y es común producirlo con un alma alveolar para mejorar su resistencia.



07. BUSINESS INCUBATOR IN ARCHENA

Por otro lado tenemos los plásticos termoestables, que durante el proceso de sintetización los someten a altas presiones y temperaturas consiguiendo que las cadenas poliméricas pierdan las ramificaciones, convirtiéndose en cadenas totalmente lineales que se cruzan entre sí. Es por este motivo que una pieza de este tipo no puede ser reutilizable una vez acabado el proceso. Como resultado se obtiene un plástico por lo general mucho más resistente que los termoplásticos y en su mayoría se pueden usar en un contexto estructural.

- UP o Poliéster. Presenta un buen comportamiento a tracción y al choque. Se suele utilizar como material textil para estructuras tensadas y cubiertas. No obstante, también se produce como un elemento rígido, pudiendo ser reforzada con fibra de



08. SERPENTINE SACKLER GALLERY

vidrio o fibra de carbono en su estado de resina, para realizar estructuras muy finas y ligeras pero resistentes. Se aplica en las carrocerías de coches, barcos y piscinas.

- PF o Fenólicos. Muy buena resistencia mecánica y capacidad aislante. En forma de resina se usa para conglomerados de madera y otro tipo de paneles. No solo otorga adherencia y compactación a las fibras para mejorar su funcionamiento mecánico, sino que también las hace hidrófugas.



09. EXPO 2000 HANNOVER

- UF o Urea-Formaldehído. Se consigue a partir de un gas de nombre homónimo y al igual que los plásticos fenólicos, suele usarse como material aglomerante para tableros de madera. A diferencia del anterior es más sencillo de producir y se aplica muchas veces de barniz o acabado, además de material adhesivo.



10. SHEFFIELD WINTER GARDEN

- EP o Resina Epoxi. Una de las mayores ventajas de estas resinas es que no necesita de procesos térmicos para ser moldeada. Consiste en dos componentes que al mezclarse reaccionan causando la solidificación de la resina, cuyo proceso de curado se puede realizar a temperatura ambiente.



11. FILAMENT TOWER

En dicho proceso las moléculas cristalizan en enlaces cruzados por lo que su peso molecular es elevado. Prácticamente es un compuesto inerte, resistente y cuanto

menos adherente. También se usa de aglomerante, adhesivo para prótesis en estructuras o de refuerzo de uniones.

Como última categoría, los elastómeros, cuya configuración molecular son cadenas dispuestas en forma de malla. Esta disposición de las macromoléculas proporciona al material mucha elasticidad, pues las largas cadenas de polímeros no se cruzan ni forman nudos; se disponen paralelas unas a otras y se tocan por medio de otras cadenas más cortas. Trabajan muy bien a esfuerzos normales (compresión y tracción) pero se deterioran con las altas temperaturas; *ergo*, no es posible reutilizarlos sometiéndolos de nuevo a procesos térmicos.

- CA o Caucho. Se obtiene de forma natural de un grupo de plantas llamadas coloides y se extrae en forma lechosa. Una vez procesado, el caucho sintético llega a soportar grandes esfuerzos mecánicos, se hace resistente a ácidos, a los cambios de temperatura y al desgaste. Lo más común es verlo en el ámbito automovilístico para neumáticos o en pavimentaciones de edificios o exteriores.



12. SOUNDHOUSE

- PCP o Neopreno. Muy semejante al caucho pero con propiedades diferentes. Es muy buen aislante eléctrico o hidráulico. Se aprovecha como relleno para juntas de dilatación y acabados por su resistencia a las sales y la luz solar.



13. VOLVO PURE TENSION PAVILION

- PUR o Poliuretano. Aplicado en forma de espuma se usa como aislante térmico, aislante acústico, impermeabilizante y sellados. Puede conformarse en planchas de peso liviano para algunos tipos de acabados pero no se le atribuye resistencia alguna.



14. THE COUCH MVRDV

- SI o Silicona. Se fabrica a base de silicio y carbono, la silicona se implementa en construcción por sus capacidades hidrofugantes y sellantes. Sirve tanto para pequeñas juntas como para juntas estructurales. Es muy elástico y admite sin problema esfuerzos de tracción y compresión.



15. RUBBER HOUSE

A día de hoy se siguen haciendo investigaciones centradas en mejorar los plásticos, ya sea para que tengan propiedades adicionales o para eliminar las perjudiciales. Las investigaciones están centradas en encontrar alternativas denominadas bioplásticos, es decir, polímeros que bien pueden proceder de la biomasa o tienen la capacidad de ser biodegradables. Hay universidades que han desarrollado alternativas con un biopolímero basado en azúcar y dióxido de carbono, en Tokio se está experimentando con algas y en Nebraska lo intentan con queratina procedente de plumas. Ya hay algunos en el mercado como el bio-PE, bio-PET o el PLA, que pueden suplir perfectamente a ciertos polímeros.

MATERIALIDAD Y CAPACIDADES DEL PLÁSTICO

Propiedades

Como podemos ver, pese a la diversidad de tipologías, muchas comparten características, pero desde el punto de vista estructural funcionan totalmente diferente; ya sea por el polímero base del material, por sus aditivos o por la forma de procesarlo. Esto puede ser a *priori* un inconveniente (que un material pueda comportarse de diversas formas), pero nada más lejos de la realidad, pues nos da la oportunidad de ahondar sobre cuál trabaja mejor en ciertas situaciones y bajo qué esfuerzos. Construir con plástico se vuelve un ejercicio de lo más versátil y, según la magnitud del edificio, también complejo. Por esta razón no se ha querido descartar las tipologías que por lo general no se usan estrictamente en el ámbito estructural y, por ello, cabe profundizar un poco más en las virtudes de estos polímeros.

APARIENCIA Y ACABADO

En la mayoría de los casos, los polímeros no cuentan con mucha opacidad. Sí que hemos hablado de como la transparencia absoluta del metacrilato puede sustituir materiales como el vidrio, pero que los polímeros cristalicen de esa forma no es la norma a seguir; de hecho tienen fama de ser semi-transparentes. En parte se debe a que la producción se hace con espesores muy finos. La composición molecular de los polímeros acepta una reducción importante del grosor, sin que las piezas lleguen a ser frágiles ni quebradizas. Podemos decir, pues, que la forma de moldear o producir los plásticos es importante no solo porque ayuda a ahorrar material, sino también porque aprovecha el hecho de estar constituida por cadenas de partículas de carbono e hidrógeno.

Como es un material que se fluidifica con el calor (la mayoría de ellos), se trabaja en este estado. Esta es la propiedad sobre la que pivotan todos los métodos de generación de piezas poliméricas. La capacidad de que sean extruibles permite usar moldes huecos conectados con inyectores para rellenar el negativo de la pieza. Otra forma de trabajar con moldes es la laminación y normalmente se recurre a este método para piezas exageradamente grandes para no desperdiciar demasiados recursos en el molde en sí. El molde en cuestión, se trata de una superficie con el relieve de la pieza a la que se le van

añadiendo capas de material. Es usual ver el método de laminado para piezas hechas de compuesto: se le llama matriz al material continuo que hace las veces de conglomerante, normalmente resina de poliéster o epoxi, y el refuerzo es el material encargado de mejorar las propiedades mecánicas del conjunto como la fibra de carbono o de vidrio. El proceso consiste en colocar encima del molde las capas de matriz y refuerzo sucesivamente hasta alcanzar el grosor deseado, controlando la proporción de ambas partes.



16. LAMINADO

Para piezas con espesores realmente despreciables no hay mejor forma de moldearlas que por medio del soplado o el moldeo al vacío. El soplado tiene una función semejante a los moldes de inyección, pero dejando solo una pequeña película de material en la superficie de la pieza y el resto del interior totalmente hueco. Por otra parte, el moldeo al vacío se consigue con una plancha de polímero previamente calentada y gracias a su estado gel, los succionadores tiran del material que se ajusta al molde y adquiere su forma. Sin embargo, la forma más delgada de procesar el plástico es a través de extrusores. El plástico entra en un circuito de calor en cuyo extremo está la boquilla con el diámetro equivalente al grosor del hilo deseado que deberá ser enfriado rápidamente. Esto también lo aprovechan los sistemas de impresión 3D, que usan PLA o ABS ya que tienen un punto de fusión más sencillo de conseguir (200 °C) para entornos domésticos, sin llegar a ser peligroso.



17. THE SOLAR BYTES PAVILION



18. ARBOSKIN

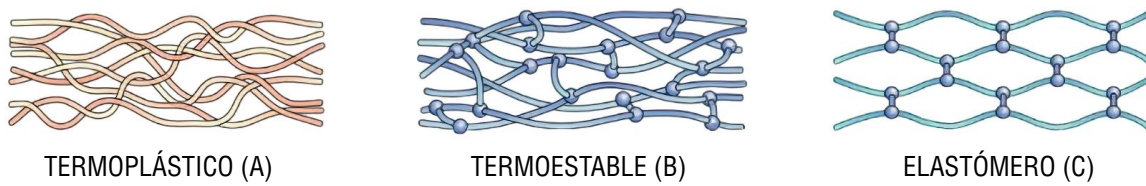
La producción de piezas de mediana y pequeña envergadura está normalizada en el sector por lo que cabe preguntarse: ¿Podría producirse una estructura de plástico en masa?. Esta cuestión se puede abordar desde dos puntos de vista diferentes.

En primer lugar, siguiendo en la línea de lo que se estaba hablando, el hecho de que los polímeros tengan un estado líquido o viscoso permite obviamente generar una única pieza de gran envergadura; como podría funcionar el hormigón en masa. El plástico también sufre de retracciones durante la reacción exotérmica en el proceso de curado, pero esto es fácilmente controlable con aditivos o resinas de escasa retracción. Otro repunte sobre el tema es que dada la alta densidad de algunos polímeros, sería bastante ineficiente hacer estructuras macizas, desaprovechando la resistencia que suele tener este material con poco canto. Esto nos lleva al otro punto, realizar una estructura en varias piezas no significa que los elementos unitarios trabajen de forma diferente. Los polímeros son bastante cohesivos incluso interactuando con otros materiales, por lo que no es descabellado pensar en una estructura completamente continua, pero que se ha construido en pequeñas partes pegadas con más plástico. Con esto garantizamos su fabricación en taller para moldear las piezas con cualquier tipo de geometría y tan huecas como precisen.

PROPIEDADES MECÁNICAS

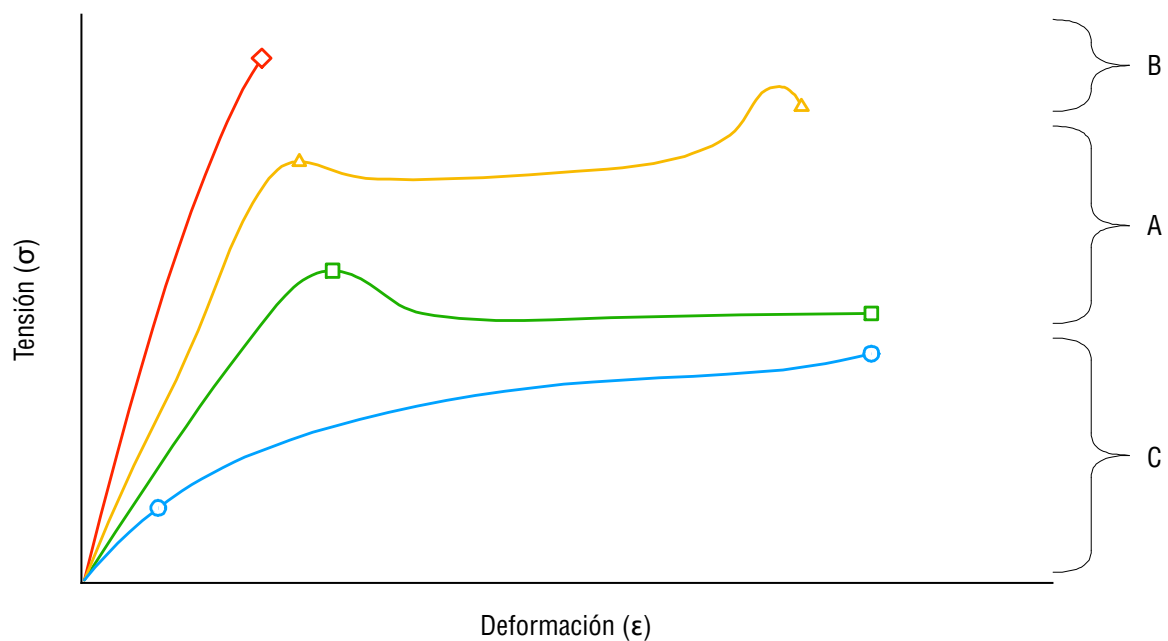
Los polímeros se caracterizan mayormente por su dureza y resistencia a la fractura. No tienen apenas deformación elástica pero lo compensan al tener un gran rango de deformación plástica antes de rotura; los plásticos nacieron del concepto de plasticidad. El comportamiento mecánico va a depender de la densidad molecular de cada polímero. Se ha visto que también se suele alterar su contenido en aire y porosidad para generar espumas, pero esto solo hace que el polímero no sirva como elemento portante. Al ser un único compuesto a base de enlaces de carbono, es necesario poner atención a su comportamiento atómico para entender sus propiedades físicas. Lo que más influye en este sentido, es la forma en que interactúan entre sí los monómeros. La cristalización del material durante el proceso de curado determina en gran medida como va a trabajar el compuesto resultante. No quiere decir que el curado en sí altere las propiedades del producto, que también, sino

que se refiere a los enlaces moleculares por los que se caracterizan los plásticos. Esto nos lleva a que cada tipología expuesta anteriormente tendrá un comportamiento propio.



○ Plastificado □ Estirable ▲ Deformable ◇ Frágil

Curva tensión-deformación típica



A excepción de los termoestables, el resto de plásticos presentan un buen comportamiento dúctil, pues admiten mucha deformación antes de que la estructura pudiera fallar. En general, la mayor parte de la deformación sucede en rango plástico, ya que sobretodo los elastómeros llegan muy rápido a su límite elástico, por lo que no existe proporcionalidad entre las tensiones que absorbe y su alargamiento. Los termoplásticos tienen mejor diferenciados los dos comportamientos, esto se debe a la dualidad de sus moléculas. En primer lugar, existen pequeñas regiones cristalizadas y alineadas a nivel molecular dentro de un termoplástico. Debido a la ordenación de las partículas de carbono, estas regiones son muy compactas y resistentes. Durante las primeras instancias de hacer entrar en carga a un termoplástico, los cristales se mantienen intactos, absorbiendo el esfuerzo las cadenas amorfas de monómeros. Al tener más libertad de movimiento, se adaptan a la dirección de

la tensión y funcionan como muelles. Una vez llegados al límite de lo que pueden soportar las uniones amorfas de monómeros, se empiezan a resentir las partes cristalizadas del polímero. Es en este punto que acaba el comportamiento elástico y entramos en régimen plástico. Los cristales se van desprendiendo unos de otros y empiezan a romper algunas de las cadenas amorfas hasta que fallan en su totalidad.

La estructura microscópica de los termoestables presenta polímeros cruzados enlazados entre sí. Cuando se somete a una carga, las uniones deforman análogamente a como lo hacen los polímeros semicristalizados. La diferencia reside en que el entrelazado químico de las partículas impide el movimiento de las cadenas poliméricas, dando como resultado una alteración de como se manifiestan las tensiones y deformaciones pequeñas. La cantidad de entrelazamientos y su peso molecular es lo que alterará la curva de tensión-deformación. Bajo grandes cargas, las cadenas poliméricas entrecruzadas a duras penas pueden deformarse y rompen antes de que puedan entrar en régimen plástico.

Otra propiedad totalmente ligada a la disposición molecular de los polímeros es la anisotropía. Es la capacidad por la que las fibras de los materiales son capaces de tener diferentes comportamientos mecánicos según se orienten, es decir, que según la dirección en el que se realice el ensayo el material tendrá un eje fuerte y un eje débil. Por lo general los termoplásticos debido a su no-alineación son capaces de trabajar en cualquier dirección de la misma manera. No obstante, se han visto alteraciones de la resistencia tanto de los termoplásticos como de los termoestables tras un proceso de extrusión y de estirado. El proceso de extrusionado dirige las “fibras” en el sentido en el que se expulsa el material por la boquilla y el estirado es un tratamiento complementario a lo anterior que aumenta la anisotropía según la dirección de los rodillos.

Debido a este cambio de la morfología de la estructura molecular, el material pierde capacidades beneficiosas; especialmente en los casos de filamentos o películas. Los plásticos isotópicos admiten reducciones de espesor importantes sin que las piezas pierdan rigidez y tienen un mejor comportamiento mecánico para prevenir desgarres. Las películas poliméricas consiguen ser más livianas y más eficientes en el modo de disipar energía por deformación. Para conseguir disimular la anisotropía se puede recurrir a un material con

mayor peso molecular, aumentar los espesores de las piezas o incluso combinar el polímero anisótropo consigo mismo pero variando su orientación.

Por otro lado, las moléculas de los termoestables interactúan entre sí. En el caso del poliéster, su gran ductilidad y adhesión (además de ser la más económicas de las resinas) son las causantes de que los estudios de anisotropía mecánica en los polímeros estén enfocados a este material. Se suele mezclar con fibra de vidrio o carbono, dando lugar a un compuesto. Estableciendo el poliéster como matriz base, se pueden apreciar las variaciones que conlleva aumentar la cantidad de fibra en las muestras:

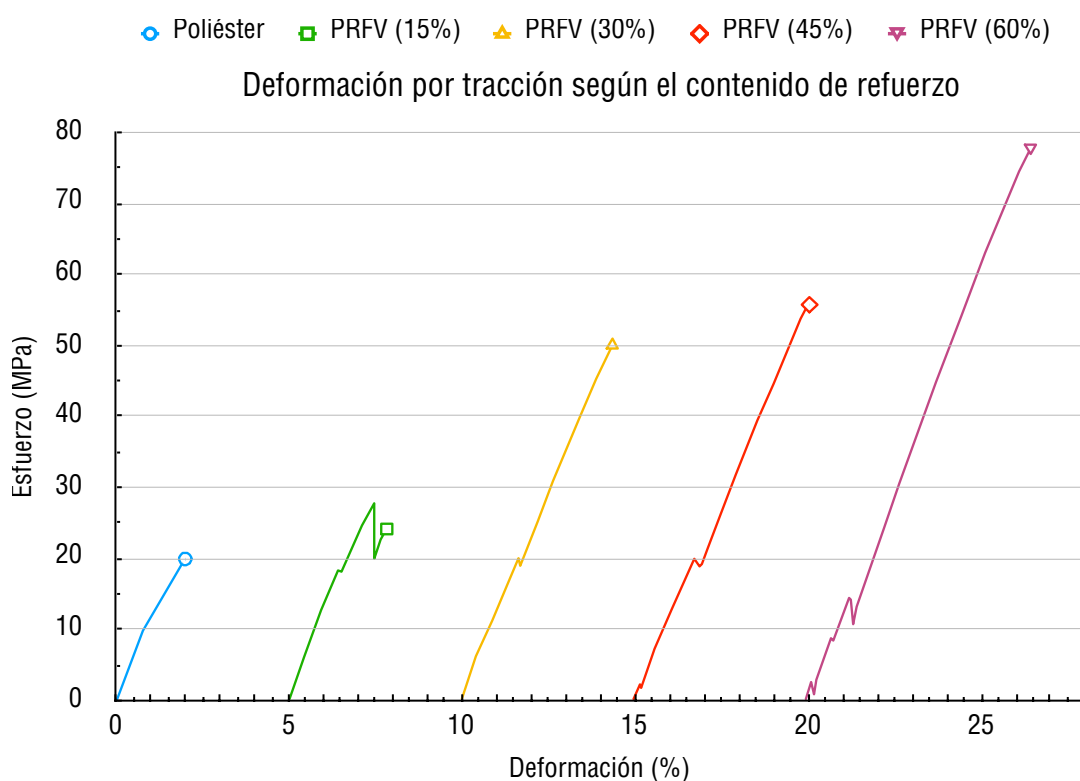


Tabla 1. Ensayo a tracción de poliéster reforzado con fibra de vidrio

Muestra	Contenido de fibra de vidrio	Carga máxima (kN)	Límite elástico (MPa)	Punto de rotura (MPa)	Elongación máxima
Poliéster	0 %	2,708	10,29	19,76	2,01 %
PRFV (15%)	15 %	3,504	18,63	28,25	4,05 %
PRFV (30%)	30 %	4,828	20,32	50,82	6,22 %
PRFV (45%)	45 %	5,370	21,08	56,53	7,27 %
PRFV (60%)	60 %	7,489	12,54	78,83	9,28 %

Con los compuestos no solo se pueden conseguir mejores estados límite de cargas en el poliéster, también se aumenta el régimen elástico en el que se manifiestan las deformaciones. El plástico es un material muy flexible, con una gran eficiencia energética durante todo su ciclo de vida. Pero esto en lo referido a su comportamiento para elementos flexotraccionados, el poliéster (como la amplia mayoría de polímeros) puede funcionar como un textil. Son fácilmente procesados como telas no tejidas y pueden unirse con métodos químicos, mecánicos y térmicos.

No obstante, podemos alterar intencionadamente el comportamiento mecánico del plástico. Su capacidad para ser moldeado de la forma que queramos ya nos ha dado muchas ventajas con respecto al resto de materiales en la construcción, pero también nos puede aportar versatilidad en la forma de transmitir las tensiones. Cambiando la sección en las uniones entre piezas, podemos sacar mucho partido a su flexibilidad: en zonas equivalentes a los vanos, conseguiríamos cierta rigidez con algo de canto y si procede, también un refuerzo de fibra; pero con estrechamientos en los puntos de union entre elementos, conseguimos que puedan comportarse como nudos rígidos, semirrígidos o articulados.

La diferencia con los métodos tradicionales es que en ningún momento hay un cambio de materialidad, ni siquiera tienen porque haber juntas. La energía sería fácilmente transmitida de un elemento portante a otro hasta llegar a la cimentación, se distribuirían las tensiones y soportaría mayores cargas. Para una estructura de plástico no existen los desgarros ni las roturas de anclaje por faltad y adherencia.

Tabla 2. Estados límite de diferentes polímeros

Polímero	Resistencia a compresión (MPa)	Resistencia a tracción (MPa)	Resistencia a flexión (MPa)	Resistencia a timpacto (MPa)
EPS	0,1	-	0,2	-
PE	10	12	-	no quiebra
PVC	70	50	110	10
PS	100	60	100	3
PC	120	60	90	2
PF	200	35	60	1,2
PL	180	75	150	20

PROPIEDADES QUÍMICAS

En general los plásticos son inertes, es un material que no interactúa ni reacciona con otros compuestos. Esto viene bien contra las agresiones de ácidos o álcalis, por ellos es que tienen mucha durabilidad. Su introdujo en la construcción debido a que no se degrada ni altera la salubridad. Son inmunes prácticamente a la corrosión y no se oxidan, potenciado por la ausencia de poros y su estructura orgánica no-iónica. Resisten a los microorganismos y tiene un buen comportamiento frente a los agentes atmosféricos al intemperie. Por todo ello es por lo que se usa como barrera contra el agua y como aislante térmico u acústico.

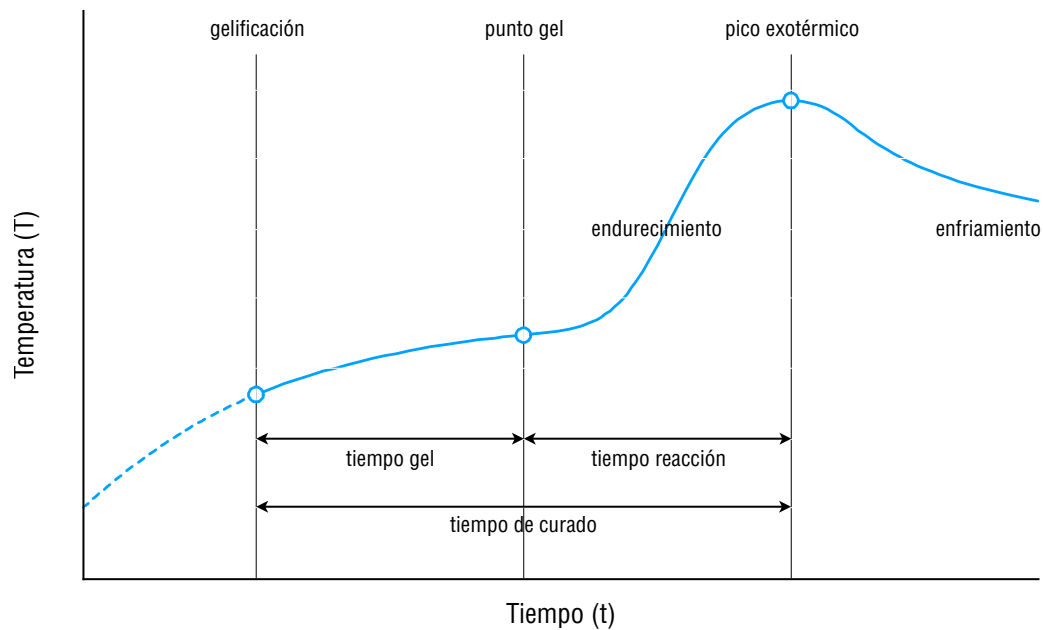
Sin embargo, pese a que también puede funcionar como aislante térmico, la temperatura es su mayor problema. Las temperaturas extremas afecta mucho a los polímeros, con un descenso de su resistencia en temperaturas altas y aumento de la fragilidad en temperaturas bajas. Lo que quiere decir que mientras el plástico no sea estructural no debería representar un handicap. Pero en el tema que nos ocupa, deberíamos saber como salvar esta clase de situaciones para que el plástico sea apto para el servicio. También su combustión puede producir humos altamente tóxicos; sin embargo, hay casos en que el propio material puede ser ignífugo y resistir temperaturas muy altas como el caso de los plásticos termoestables.

Siguiendo con los problemas de temperatura, puede incluso interferir en la polimerización del material durante el proceso de curado, dando como resultado variaciones en su resistencia y comportamiento. A priori, se puede aumentar o disminuir la velocidad de curado según la proporción de catalizador que se emplee, pero la temperatura ambiente también puede tener los mismos efectos. El curado es una reacción exotérmica que se manifiesta al mezclar el catalizador y el acelerador con el que conseguimos el proceso de polimerización del material. Por separado ambas sustancias se mantienen en un estado viscoso, casi líquido.

Una vez combinadas ambas partes, hay una pequeña porción de tiempo en el que no hay cambios aparentes; pero la argamasa sí que empieza a calentarse. Esto se le conoce como tiempo gel donde podremos trabajar con la resina mientras aún esté en estado viscoso. Una vez traspasado este punto ya empieza el endurecimiento, conocido como tiempo reacción.

En conjunto equivalen al tiempo de polimerización de la resina. Mientras la pendiente de temperatura sea positiva el polímero seguirá ganando resistencia. El tiempo de curado se interrumpe al alcanzar el pico exotérmico, la curva de temperatura se aplatana y ya solo queda dejar enfriar el producto solidificado para poder manipularlo con seguridad.

Curva temperatura-tiempo en el proceso de curado de una resina

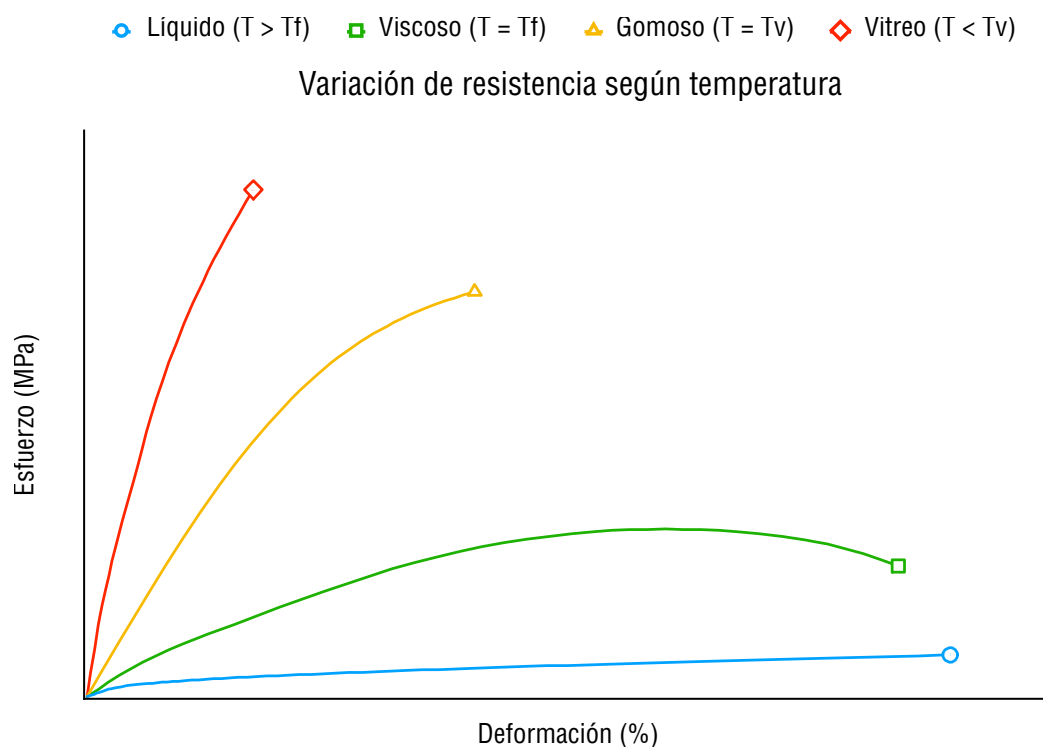


El contraste de temperatura en el momento de inicio de la polimerización con el pico exotérmico es lo que va a determinar si la resina tendrá un mejor o peor comportamiento. Contra lo que pudiera parecer en un principio, que el proceso se haga más lentamente no es beneficioso: las bajas temperaturas provocan una polimerización larga y deficiente. Esto es difícil de contrastar a simple vista, ya que en apariencia la resina sólida se ve igual, pero esta situación es fácilmente salvable con componentes aditivos y acelerantes. Cada tipología tiene un tiempo de polimerización límite que, una vez sobrepasado, no va a mejorar su consistencia; por eso es importante la rapidez de la reacción. De hecho, cuanto más rápida sea, mayor temperatura alcanzará y mayor resistencia mecánica presentará, llegando a alcanzar los 200 °C. Se recomienda trabajar con resinas sin potenciadores siempre que la temperatura ambiente esté por encima de los 15 °C.

PROBLEMAS DE RIGIDEZ

Limitaciones

Las deficiencias que presentan los polímeros vienen dadas por los medios en que puedan absorber energía. Hemos visto que son inertes a un amplio espectro de materiales y tampoco interactúan con la electricidad; no obstante las únicas energías que sí lo hacen son la térmica y la de deformación tras poner el material en carga. También puede verse afectado por la absorción de energía radiante luminosa, especialmente las de menor longitud de onda como la ultravioleta. La degradación es producida por la alteración de la estructura química del polímero cuando la energía absorbida es mayor que la de los enlaces moleculares, generando así una rotura. Con el tiempo la superficie del polímero envejecería y desarrollaría una pérdida de características, pero como solo afectaría a la capa exterior del mismo, el plástico podría seguir funcionando estructuralmente. Sin embargo, la radiación que sí nos genera una problemática importante es la térmica.



Por un lado tenemos los termoplásticos, que como su propiedad principal es la de ser fácilmente moldeable reiteradas veces, su resistencia a las temperaturas es irrisoria. Cuando se les aplica calor a los enlaces, cuya estructura no está interconectada, se

desenrollan y entran en un estado viscoso con un comportamiento más dúctil si cabe. Las cadenas poliméricas podrán moverse libremente mientras haya presencia de calor hasta que se enfríe y vuelva a comportarse como un sólido. La única condición es que no irradiemos al termoplástico con una energía térmica superior a la temperatura de fusión (T_f).

Si vamos más allá y aplicamos mucha temperatura, no será suficiente dispararla con el movimiento de las moléculas, en cuyo caso, empezarán a destruirse los enlaces covalentes de las cadenas principales (las cadenas poliméricas); el plástico se carbonizaría y ya no sería útil. Aplicado a la seguridad estructural, sería difícil que una estructura de plástico garantizará la evacuación en caso de incendio, pues empezaría a derretirse rápidamente y su carbonización generaría humos altamente tóxicos. Lo cierto es que los polímeros pueden ser fuente de calorías durante la combustión, pero tampoco son buenos transmisores de calor.

Por otro lado, los termoestables carecen de temperatura de fusión. Como ya sabemos, los termoplásticos no pueden volver a ser fundidos una vez terminado el proceso de curado. En su lugar tienen un límite calorífico a partir del cual se carboniza, se le llama temperatura de degradación. Este punto térmico se sitúa por lo general no muy lejos de los valores de las temperaturas de fusión de los termoplásticos; pero en comparación a los materiales habituales de construcción sigue siendo bajo. Para empeorar la situación, los polímeros son unos materiales cuya combustión produce mucha calor, por lo que facilitaría aun más llegar al estado límite de un plástico durante un incendio.

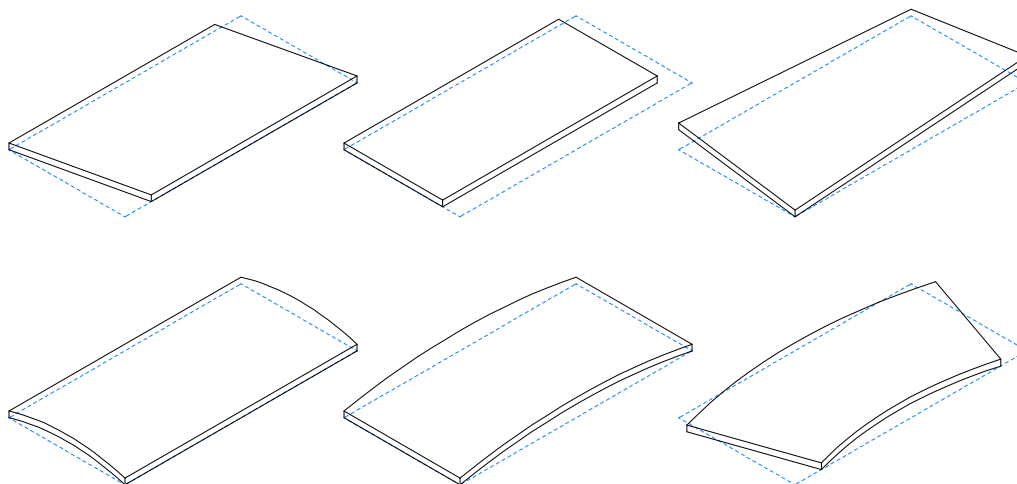
Tabla 3. Poder calorífico y temperaturas límite de los polímeros

Polímero	Poder calorífico (MJ/kg)	Temperatura de vitrificación (°C)	Temperatura de fusión (°C)	Temperatura de degradación (°C)
PE	44	-120	137	-
PS	37	125	240	-
PC	29	145	230	-
PF	26	60	-	250
PMMA	25	105	220	-
PL	24	75	-	260
PVC	20	87	212	-

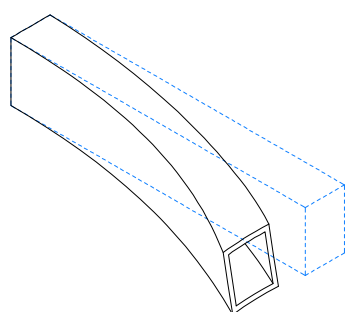
Si para las altas temperaturas el plástico se convierte en una masa maleable y dúctil, para las bajas temperaturas es todo lo contrario. Empieza a volverse frágil y rígido pues las moléculas no son capaces de moverse para transformar el esfuerzo en deformación. Las tensiones acaban por generar fisuras locales, destruyendo las cadenas poliméricas y agrietando el material. Hay una transición inversamente proporcional entre la rigidez y la resistencia a estados límites últimos en los plásticos a bajas temperaturas. Es un comportamiento semejante a cuando se carbonizan los polímeros, y sucede siempre que sobrepasemos la temperatura de vitrificación.

Otra problemática a la que deberíamos hacer frente es la deformación plástica en sí a temperatura ambiente. Por una parte la incapacidad de que algunos plásticos muy dúctiles no puedan volver a su estado previo con el tiempo nos daría como resultado un exceso de flecha o desplome que el Código Técnico no contempla como válido. El material se resentiría con cargas que, aunque no fueran permanentes sus deformaciones sí lo serían, lo que quiere decir que habría un fallo al llegar al estado límite en servicio a causa de la afluencia. Para garantizar el uso de plásticos en la construcción deberíamos recurrir siempre a los compuestos con fibras de refuerzo tal y como ya hace la industria. Por ir más allá, también existen aditivos que contrarrestan el deterioro por radiaciones y materiales entumescentes de la misma familia que lo preterían del fuego.

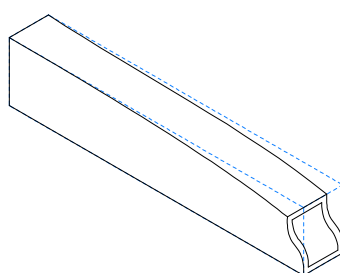
Manteniendo las condiciones térmicas idóneas para que no cambie la consistencia del plástico, también existen otras consideraciones por las que los componentes poliméricos no resultan útiles estructuralmente si no se solucionan con el diseño adecuado, pues el diseño contribuye a reforzar o debilitar la estructura. La ortogonalidad con la que estamos acostumbrados a construir es uno de estos factores. Los ángulos agudos y los cantos rectos son formas propensas a concentrar esfuerzos. Teniendo en cuenta la deformabilidad del plástico, un diseño de pórticos con uniones ortogonales estaría favoreciendo la distorsión de la envolvente estructural. Pero la solución es sencilla a la par que efectiva; se puede recurrir a los chaflanes o radios lo más generosos posibles para que no lleguen a concentrarse los esfuerzos y que de este modo fluyan por todo el material; esto no solo funcionaría con los materiales polímeros.



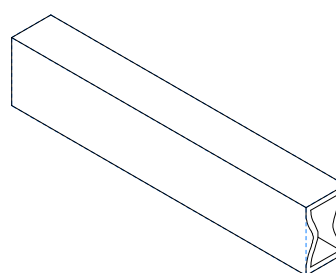
Las propiedades resistentes de los plásticos y su forma de producirlos los condiciona a la elaboración de piezas con poco canto. Al igual que sucede con los aceros laminados, el espesor con el que se construyen los elementos provoca la aparición de problemas de estabilidad de segundo orden, el pandeo. Existen muchos tipos de pandeo y dependen de la forma de la pieza, como se distribuyen los esfuerzos por la sección o el grado de libertad de los apoyos en los extremos. El pandeo es un fenómeno que aparece con la compresión, más concretamente por las imperfecciones del elemento comprimido y de la fuerza, ambas provocan que el esfuerzo tenga una resultante excéntrica a la directriz de la pieza y se genere un momento flector. La magnitud del momento es directamente proporcional al nivel de compresión. Se puede presentar en toda la extensión del elemento como pandeo general, en la parte superior de la barra como pandeo lateral o en zonas específicas del canto como el ala o alma, más conocido como abolladura.



DISTORSIÓN



PANDEO LATERAL



ABOLLADURA

$$\text{Esbeltez: } \lambda_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr}}}$$

$$\text{Delgadez: } \frac{d}{t} \leq 70\epsilon$$

Las abolladuras se producen con motivo de las grandes fuerzas de compresión que sufre la sección, por lo que este efecto de inestabilidad estará presente en los elementos portantes, los nervios. Sin embargo, puede ser frecuente el pandeo lateral en cualquier clase de pieza polimérica según lo empotrada que esté teniendo en cuenta la expansión del material con el calor. La expansión en sí es una reacción termoquímica, pero la consecuencia es física, pues produce tensiones como para que la pieza se curve por este efecto. Es frecuente ver esto en elementos que abarcan un área continua de gran extensión, pudiendo resolverse con juntas de dilatación; en el caso del plástico es aun más fácil que suceda este efecto incluso en piezas no muy grandes.

Las membranas no-tejidas pese a estar traccionadas también son capaces de tener un efecto de inestabilidad al tensarlas únicamente en una dirección. La tela se arruga y esas ondulaciones funcionan como mecanismos capaces de moverse libremente en la dirección perpendicular a la fuerza que tensa el material. Para que esto no suceda de nuevo recurrimos a las formas para rigidizar correctamente la estructura. Se suele recurrir a tipologías de doble curvatura, ya sean anticlástica o sinclástica.

En este tipo de estructuras también es muy importante como se unen entre sí las membranas o como se les aplica la fuerza necesaria para traccionarlas. Si consiste en un único punto de contacto muy concentrado, el resultado será un desgarró de las fibras y la estructura no será apta por fallo local. Hay que evitar en la medida de lo posible los punzamientos y separar posibles agujeros del borde de la membrana. Se puede hacer uso de cables dentro de los remates del borde o elementos comprimidos encargados de tensar la estructura en área, como podría ser un arco. Las piezas de plástico rígido por otro lado, suelen estar unidas por tornillería que podría fácilmente aboyar la capa de plástico y agrietar el agujero, concediéndole holgura. Se utilizan arandelas para el correcto asiento de la fuerza de unión para distribuirla en área y que el material próximo al tornillo la admita sin deformación.

MÉTODOS DE RIGIDIZACIÓN

Estructuras Nervadas

Uno de los primeros sistemas que vamos a analizar para rigidizar el plástico es el uso de formas nervadas y curvadas para redirigir los esfuerzos. Según la proximidad de estos nervios pueden hacer las veces de viguetas o directamente de vigas. Esta composición estructural hace uso de la geometría y sus propiedades para que las piezas ganen inercia, no flecten y consigan llegar las cargas a la cimentación. Las nervaduras es un concepto altamente presente en todas las estructuras; sea cual sea su composición. La principal ventaja es que no todo el paramento tiene la misma sección, lo que le da ligereza y por consiguiente, se libera de cargas permanentes por peso propio. De este modo los materiales estructurales solo estarán dispuestos en los nervios, pero en nuestro caso, podremos dar forma al plástico para que pueda conformar tanto las nervaduras como el entrevigado. Los nervios suelen tener cierta inclinación con respecto a la dirección de las cargas para que trabajen de forma más eficiente en los nudos sin tener que empotrarlos. Este es uno de los métodos más utilizados en estructuras de plástico, especialmente en sus inicios en la década de los 50s y 60s con el auge de las viviendas prefabricadas y el futurismo.

VENTURO C.F.

Dentro del espectro de casa prefabricadas a la que ya pertenecía la Casa Futuro de Matti Suuronen, la Venturo fue un diseño continuista en cuanto al material de construcción y montaje. Existían varios prototipos según el programa y la escala: C.F. Futuro, FF-12, C.F.-100/200, C.F.-10, C.F.-16 y la que nos concierne, C.F.-45. El propósito de este diseño estaba orientado sobretodo a casas de fin de semana transportables o sucursales pequeñas para negocios. La unidad básica del Venturo se componía de tres partes: fachada, medianera y otra fachada; pero la modulación permitía generar un complejo más amplio con las combinaciones de módulos adicionales. La cascara estaba completamente elaborada con poliéster laminado, aditivado con fibra de vidrio que le otorgaba mejores prestaciones mecánicas y térmicas con un alma hecha con planchas de espuma de poliuretano expandido de 5 cm de espesor.



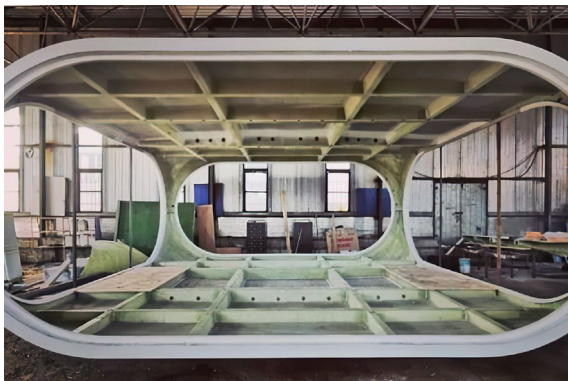
19. VENTURO C.F.



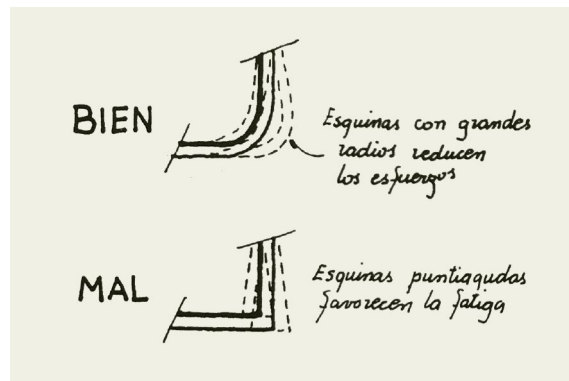
20. MODELO RESTAURADO POR RÖDA MÖLLAN

La construcción podía alzarse fácilmente sobre una cimentación de rastreles de madera que, según las condiciones del terreno, no siempre era necesaria. Es una estructura muy ligera, apenas 90 kg por metro cuadrado soportados gracias al entramado reticular de nervios en el interior de techo y suelo. Las cargas viajan por estos nervios hasta la fachada donde la forma curva distribuye las cargas verticalmente. En la fachada, que es totalmente de vidrio, es donde se esconden los pilares a modo de carpinterías, que solo trabajan a compresión simple.

Para que no haya flechas dispares entre módulos, el perímetro de la fachada está completamente arriostrada con una perfilera de aluminio, que vuelve a estar embebida en la carpintería perimetral. Hay dos tipos de módulos (de extremo y de medianera) y se dividen en dos piezas (la superior y la inferior), que en el caso de las esquinas curvas se encajan entre sí con una pieza de aluminio. Para que puedan ser desmontables, las uniones están constituidas por tornillos de gran calibre. El conjunto al final no debe pesar más de cuatro toneladas y se puede cargar en un camión, ocupando un volumen de carga de 2'3 x 1'15 x 6'9 metros.



21. ESQUELETO DE NERVADURAS



22. ACABADO CURVO

KUNSTSTOFFHAUS FG-2000

Nacida de la ambición del diseñador Wolfgang Feuerbach, la Kunststoffhaus fue uno de los primeros modelos de una casa hecha de plástico dentro de la obra de Feuerbach. Ya tenía recorrido con el diseño de mobiliario y elementos decorativos con polímeros, pero este material le fascinaba hasta tal punto que decidió reinventar el concepto de casa prefabricada a partir del mismo. La unidad de vivienda se compone de elementos horizontales para la cubierta y elementos verticales para todo el perímetro de fachada. Estaba modulado con un tamaño de 1'25 metros y dentro de la pieza de fachada había dos modalidades, con o sin ventana. La parte frontal y trasera se quedaban totalmente abiertas a excepción de las carpinterías de vidrio. El interior no estaba nada compartimentado, algunas partes del mobiliario (también de plástico) y cortinas eran los encargados de delimitar el programa.

Las piezas de cubierta tenían un canto de 40 cm y estaban huecas, salvo a ambos lados donde crecían las viguetas que tenían que soportar la carga de los 9'5 metros de luz. Todo estaba hecho de poliéster de baja densidad con fibra de vidrio y el alma de las piezas se aprovechaba para rellenarlo de material aislante. La parte inferior de las piezas de fachada apoyaba sobre una losa de hormigón de 15 cm en voladizo. La pieza de poliéster estaba diseñada con la forma del canto del voladizo para que este encajara dentro, posteriormente se aseguraba su estabilidad con anclajes. Normalmente la FG-2000 constituía la parte alta de la vivienda, donde estaban todas las estancias para la vida diaria o de relación social; el cubo inferior de hormigón estaba relegado a albergar las actividades laborales o de almacenaje, unidos ambos habitáculos por una escalera.



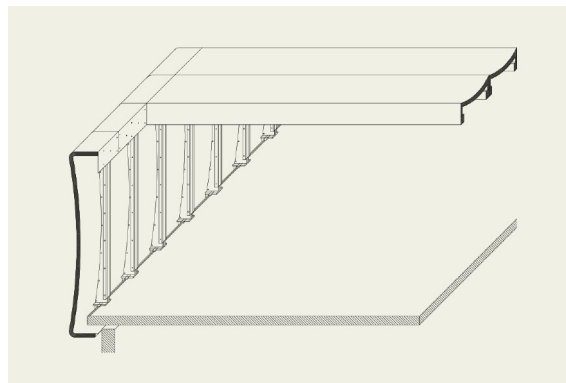
23. KUNSTSTOFFHAUS FG-2000



24. COLOCACIÓN MANUAL DE COSTILLA



25. ENSAYO DE CARGA DE TRES PIEZAS



26. SECCIÓN CONSTRUCTIVA

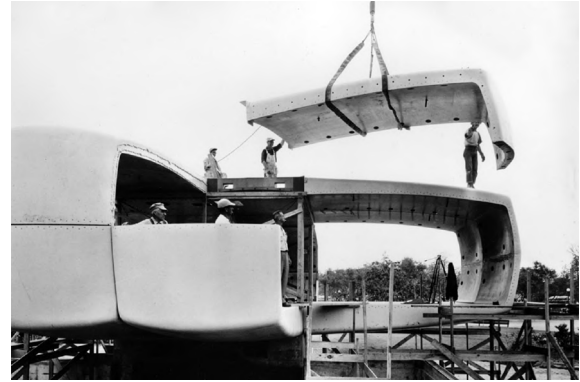
La corta modulación con la que se había diseñado los paneles generaba excesivos cortes a la vivienda por donde no sería difícil que entrara el agua. Para garantizar las estanqueidad y las condiciones de confort térmico se adhería *in situ* una banda de goma en los laterales de las piezas que, al encajar la siguiente pieza, quedaría aprisionada y contenida en la junta. La característica forma cóncava de la fachada no es fortuita, Feierbach se preocupó durante la fase de diseño de que las piezas, en caso de ser rectas, podrían torcerse por la retracción de la resina de poliéster. El techo se dimensionó a partir de varios experimentos del propio creador; incluso sometió sus piezas a la carga de un camión durante toda la noche, lo cual fue un reclamo publicitario para su obra. El autor y su familia vivieron durante años en la FG-2000 hasta que se mudaron a un nuevo prototipo de vivienda de plástico creación de Feierbach. Pese a no haber realizado reformas ni restauraciones, la FG original sigue operativa siendo usada como oficinas.

HOUSE OF THE FUTURE

También conocida como Monsanto House, la “casa del futuro” fue un encargo de la empresa de plásticos Monsanto Chemical Company, desarrollado por los arquitectos Richard Hamilton y Marvin Goody y por el ingeniero Albert Dietz. El proyecto tenía como objetivo principal ser una atracción turística más del parque Disney. Fue la oportunidad perfecta para investigar nuevas formas de diseño con nuevos materiales. La línea de esta casa sigue con el fenómeno de casas prefabricadas que ya estaba en alza por la Guerra Fría, similar a lo visto anteriormente por estar compuesto de piezas que se pueden ensamblar rápidamente y en conjunto conformar una unidad de vivienda. Sobre todo estaba orientado a familias y servía de propaganda para fomentar la nueva cultura doméstica.



27. HOUSE OF THE FUTURE



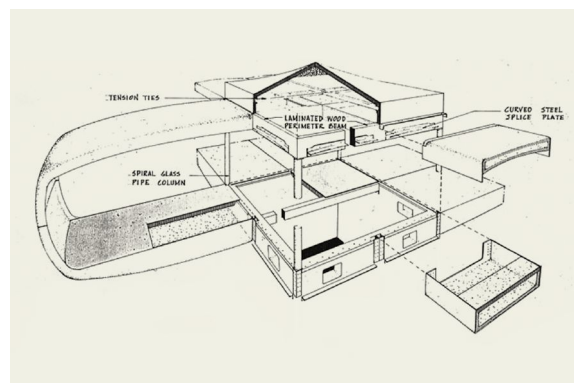
28. MONTAJE ASISTIDO POR GRÚA

La casa se organizaba al rededor de un núcleo central con forma cuadrada, compartimentando el espacio en cuatro apéndices o celdas. Este elemento vertebrador era el único punto en contacto con el terreno, pues el resto de celdas funcionaban como voladizos. Las celdas consistían en dos módulos, que a su vez, se dividían en dos partes. Cada pieza de techo escondía dos nervios y en las uniones todas las nervaduras tenían un remate con perfilera metálica para que los puntos de conexión fueran más resistentes. El peso añadido del metal obligaba a recurrir a una grúa para poder colocar las piezas.

En el corazón de la casa coexistían estructuras de los dos materiales. Por un lado, una estructura de entramado reticular de plástico para soportar el área cuadrada de pavimento y, por otro lado, en cada esquina del este área había un pilar tubular metálico que atravesaba el edificio de cubierta hasta el terreno. El pavimento de las celdas también estaba nervado pero no transmitía las cargas de forma directa al núcleo central, simplemente apoyaba en un extremo con él y en el otro se sujetaba de la parte superior del pétalo. Los creadores reivindicaron que no era suficiente sustituir el acero o la madera por el plástico, el diseño estaba condicionado por el proceso de fabricación del material polimérico.



29. EMPLAZAMIENTO EN TOMORROWLAND



30. DISPOSICIÓN DE ELEMENTOS

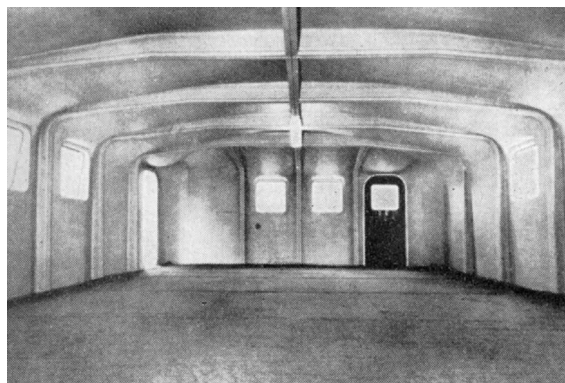
OFICINAS BAKELITE LTD. BIRMINGHAM

Este edificio no tiene un nombre oficial, ya que no se trataba de ninguna patente de venta al público. La empresa de plásticos Bakelite Ltd. en Inglaterra, decide en 1963 dar a conocer las grandes virtudes del plástico, mostrándolo como un material capaz de conformar una vivienda. Ya contaban con experiencia en esta clase de estructuras al haber sido uno de los productores de cuarteles/refugios militares durante la guerra. No cambiaron mucho el diseño original, simplemente añadieron un segundo piso que se sustentaba con perfiles metálicos. La construcción se basaba en la modulación de piezas, unas de medianera y otras de esquina, que tendrían estas variedades: ciega, con ventana, con balcón o con puerta. Los elementos eran de doble curvatura, con lo que conseguían mejor inercia en caso de movimientos horizontales. Las piezas estaban huecas para liberar peso y ambas caras de poliéster reforzado con fibra de vidrio confinaba un núcleo de espuma fenólica.

La planta baja tenía un mínimo esqueleto de barras metálicas que soportaban tanto las piezas de la fachada como de pavimento de la segunda planta. Las piezas en contacto con el terreno se anclaban a la losa de cimentación hecha de hormigón. La parte superior de la cáscara (anclada también al piso inferior por cohesión) se podía aguantar por sí misma gracias a los nervios que cruzaban toda la superficie de la cubierta y continuaban bajando por los elementos verticales. Las nervaduras seguían paralelas a las costillas, salvo un nervio central que atravesaba todo el edificio. Estas vigas no eran planas, su inclinación ayudaba a la transmisión de cargas y los acabados redondeados favorecía la transmisión de tensiones sin necesidad de haber un nudo rígido. Las piezas estaban unidas por tornillería para no perder la característica de poder ser desmontable y reutilizable.



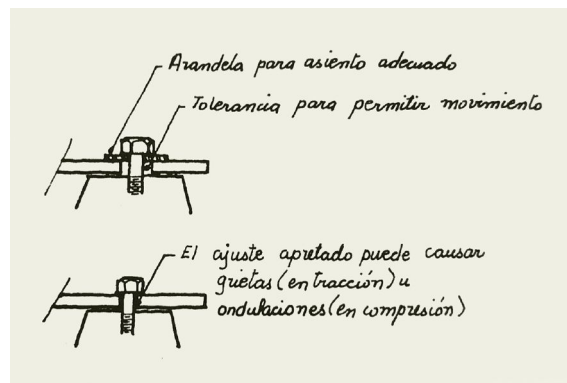
31. EMPLAZAMIENTO EN TOMORROWLAND



32. ENSAYO CON BIDONES DE AGUA



33. EMPLAZAMIENTO EN TOMORROWLAND



34. UNIÓN ATORNILLADA

El edificio de plástico se usó temporalmente como centro de oficinas adicional al que ya disponía la empresa de baquelita. El experimento resultó un éxito pues demostraron que era totalmente funcional, mucho más rápido de producir y que se podían conseguir estructuras mucho más livianas con el plástico. El edificio tenía 11 metros de largo (aunque podía seguir creciendo en dicha dirección), 7 metros de ancho y 6 de alto, pesando un total de 14 toneladas; la mitad en los elementos plásticos y la otra mitad en la estructura metálica. Una construcción de esta magnitud hecha de materiales convencionales como ladrillo o madera podía pesar 84 toneladas; nada envidiable para el plástico. Solo se conoce un caso en el que se llegó a usar este modelo fuera de la empresa de Birmingham, durante expediciones británicas en el Antártico, pero sirvió como inspiración y punto de partida para el porvenir de las viviendas de plástico, como podía ser el Venturo.

MAISON TOUT EN PLASTIQUES

Esta creación data de 1955 pero no fue presentada al público hasta el año siguiente en la exposición de la feria de las Artes Domésticas de París. En el diseño participaron Ionel Schein y René-André Coulon como arquitectos y Yves Magnant en el apartado de ingeniería. Los autores pretendían aprovechar las posibilidades que ofrecían los plásticos derivados del carbón y por ello, llegan a recurrir a catorce variedades de plástico. Pese a que tuvo mucha repercusión y aparición en los medios, la noticia no llegó a ser internacional como para condicionar las obras de plástico posteriores. Quizás fuera la primera vez que el diseño con polímeros se comprometía a general una vivienda fácil de levantar, de gran ligereza y rápida de producir. Esta *maison* fue la precursora del discurso de que la industrialización y las piezas prefabricadas podían servir en el ámbito doméstico.



35. MAISON TOUT EN PLASTIQUES



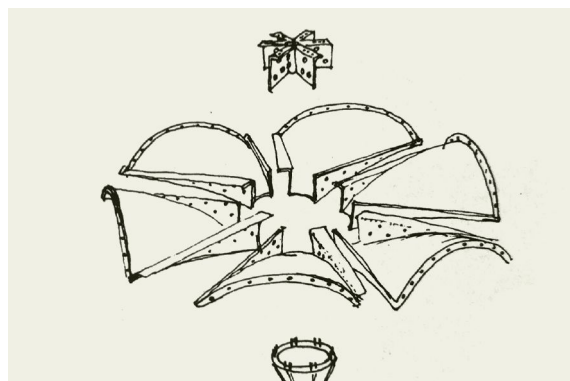
36. EXPO SALON DES ARTS MÉNAGERS

Su diseño es bastante diferenciador, aunque sigue bebiendo del aspecto de las casas prefabricadas americanas durante la postguerra. Inel relacionaba la arquitectura del plástico con lo orgánico, la naturaleza; por eso vista en planta es más sencillo reconocer la forma de caracol con la que se define el programa interior. Esto era importante porque rompía con la ortogonalidad habitual en la arquitectura hasta entonces y la figura de la espiral permitía un crecimiento orgánico ilimitado a partir de la configuración elegida por el inquilino según las necesidades.

Este modelo tenía una configuración radial de las nervaduras; los nervios eran concéntricos y nacían desde un pilar maestro en el centro de la vivienda. A diferencia del resto, las vigas no iban descolgadas, sino que sobresalían por la cubierta. La unidad mínima de la vivienda era una estancia circular donde estaban todas las habitaciones funcionales, y el resto de estancias se anexaban alrededor según el número de usuarios o necesidades. Deducimos que habían dos tipos de elementos plásticos: el círculo y las celdas exteriores. Las celdas también podían variar de tamaño y para unirlas al cuerpo principal de la vivienda se hacía a través de la cubierta atornillado los nervios de ambas partes entre sí.



37. MAQUETA DE PLÁSTICO



38. NERVIOS CONCÉNTRICOS

OBRAS RELACIONADAS



39. BUBBLE HOUSE 6 SHELLS



40. SHELLSTAR PAVILION



41. CASA EN TLAYACAPAN



42. THE GREEN MAGIC HOMES

MÉTODOS DE RIGIDIZACIÓN

Estructuras Traccionadas

Las estructuras poliméricas consiguieron un gran avance en el campo de las estructuras tensadas. Recordemos que estas funcionan por tracción para conseguir que la superficie se mantenga firme y, antes de la aparición de los plásticos, las membranas de fibras textiles no soportaban demasiados esfuerzos de este tipo; ni que decir si se trataba de abarcar una gran superficie. Debido a la composición de los plásticos las tensiones se reparten mejor por todo el material ya que no depende de fibras tejidas, mas bien las cadenas poliméricas se encargan de esta función a nivel microscópico. El comportamiento del plástico como membrana traccionada no podía ser mejor, sin olvidar que es un material inerte que ni siquiera absorbe agua. Por esta razón mayormente se ha utilizado como pieles para fachadas y cubiertas o como coberturas para sombreado en espacios exteriores. Por otra parte las membranas no son funcionales por sí mismas, necesitan de elementos adicionales como tensores, cables o barras en pos de generar la tensión necesaria para rigidizar el elemento.

JS BACH MUSIC HALL

Esta membrana diseñada por el estudio de Zaha Hadid tiene como objetivo crear una pseudo-sala para conciertos en solitario. La cobertura tiene una trayectoria con forma helicoidal irregular que gira entorno al escenario y al patio de butacas. Aunque sea difícil de ver toda la cinta blanca pernee a un mismo segmento continuo que empieza en la zona de actuaciones y acaba en la zona de acceso para la audiencia. Se trata de un dialogo formal entre el interprete, la música y los oyentes, que no solo pretende generar una dinámica fluida e íntima sino que también se preocupa de la acústica. La membrana de plástico translúcido tamiza el sonido y la luz a medida que las capas se superponen unas a otras. La membrana no consiste en una única superficie, gracias a las costillas internas entre el no-tejido existe una cámara donde se enmascara una lámina de producto acrílico con fines acústicos; ya sea para dispersar el sonido o para redirigirlo hacia el público. Los altavoces de sonido ambiente también usan este truco para ser imperceptibles.



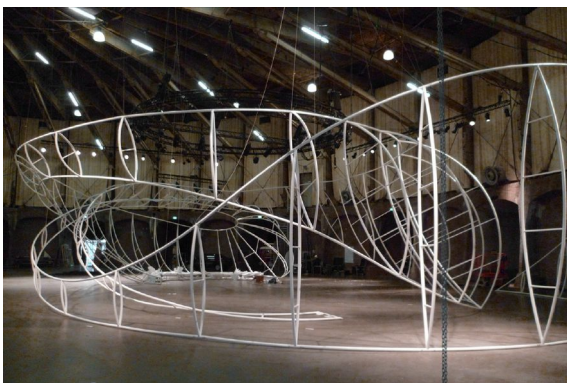
43. JS BACH MUSIC HALL



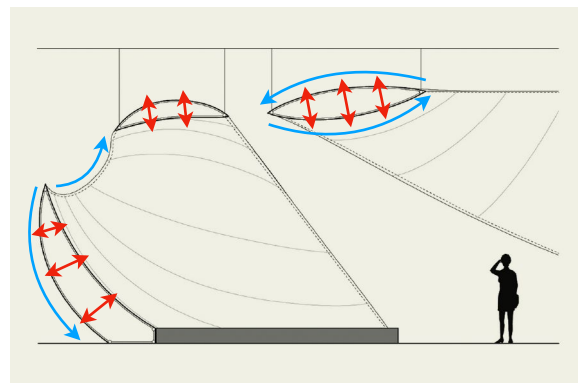
44. ESCENARIO Y BUTACAS

El intrincado esqueleto de la estructura está tendido del techo con cables de acero tintados en oscuro para que no sean apreciables a la vista. Por ello está limitada alzarse en espacios diáfanos muy grandes, pero se contempla que pueda ser desmontable para trasladarse a otra localización. Lo que realmente tensa la membrana son las costillas suspendidas por los cables. Tienen una forma convexa hecha con perfilería tubular de acero que internamente intentan tirar hacia afuera de la tela. El elemento consigue rigidizarse por la doble curvatura, no solo de las costillas, sino con las curvas cóncavas que adquiere el plástico entre costilla y costilla.

Aun así, la directriz de la helicoide no intenta ser constante, sino que cambia tanto de ancho como de dirección ocasionalmente para general los juegos visuales. Esto también lo aprovecha la tensión de las fibras pues cuanto mas pronunciado es el cambio de dirección más tensada estará la membrana. La gracilidad de la estructura se compensa con el poco peso que constituye y al estar construida en interiores, no contempla cargas horizontales por causa del viento. Los elementos comprimidos, las costillas, además de las curvas convexas, se les atribuye unos travesaños para que pese a la tensión no pierdan la forma.



45. ESQUELETO COMPRIMIDO

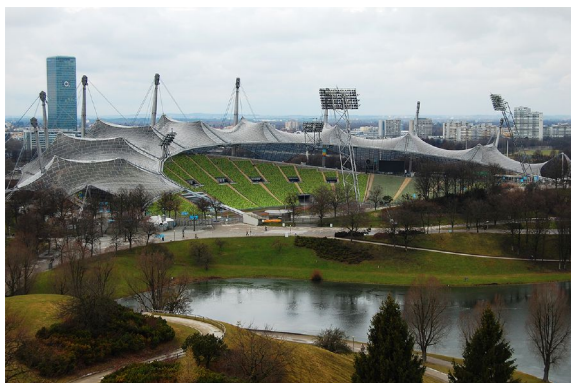


46. SECCIÓN DE LA MEMBRANA

ESTADIO OLÍMPICO DE MÚNICH

Con motivo de los Juegos Olímpicos, Frei Otto diseñó en 1972 esta estructura de metacrilato téxtil que se desarrollaba a lo largo de todo el complejo. El arquitecto alemán ya tenía experiencia en el campo de las estructuras tridimensionales tensadas y esta obra fue un hito tanto para la carrera de Otto como para la validación de las estructuras traccionadas en la construcción contemporánea. Durante las primeras etapas del equipo de diseño, se estableció que debía ser una estructura textil pero con un acabado transparente como la Expo del mismo Otto del '67. Esta decisión de proyecto no dejaba alternativa alguna, la membrana debía ser de un compuesto polimérico; concretamente se acabó eligiendo fibra acrílica de metacrilato. El estadio tardó 4 años en realizarse, finalizado apenas unos meses antes de su inauguración para los Juegos pero se consiguió recubrir los 80.000 metros cuadrados de gradas con la piel translúcida.

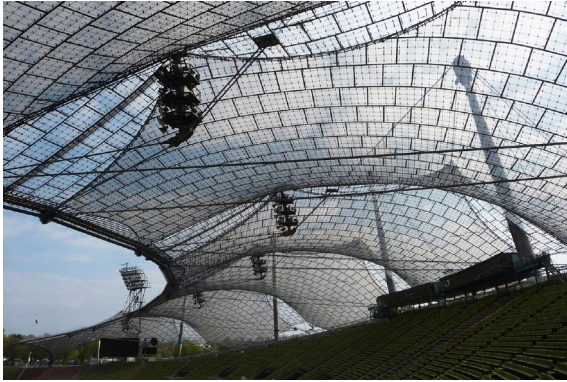
Se experimentó con maquetas de arena para encontrar la forma ideal de la estructura abovedada y se encontraron con algunos problemas, tanto de diseño como estructurales. En principio iba a ser una gran cubierta liviana sustentada por muy pocos mástiles o tensores y con el perímetro anclado al suelo. Con este diseño la curvatura de la cubierta era bastante pronunciada cerca de los mástiles, lo que le otorgaba mejor inercia contra el viento y la nieve en esas zonas, pero en los bordes resultaba totalmente lo contrario, convirtiendo estas zonas planas en el punto débil de la estructura en caso de condiciones climáticas adversas. Parece de sentido común que para pronunciar la curvatura del paraboloides hay que alejar entre sí el punto superior e inferior donde empieza a desarrollarse la curva, es decir, elevar la cumbre del paraboloides con el mástil; pero nada más lejos de la realidad.



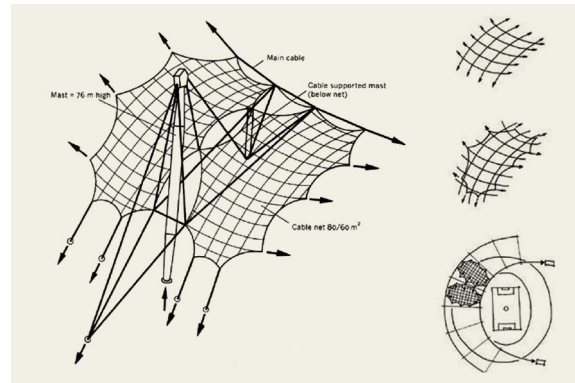
47. ESTADIO OLÍMPICO DE MÚNICH



48. VISTA AÉREA



49. MEMBRANA TRANSLÚCIDA



50. PASARELA DE SERVICIO

Hacer esta modificación solo incrementaba la curvatura en la zona del mástil (donde no interesaba) y apenas tenía repercusión en la base de la lona que seguía más bien plana. Llegaron a la conclusión de que si la parte con mayor inercia era la que bordeaba los tensores, debería haber muchos de estos elementos más para mejorar las capacidades mecánicas de la cubierta. Se subdividió la membrana en tramos o parches iguales y simétricos por lo que estaban unidos unos a otros soportando las mismas tensiones. La altura donde los mástiles tiraban de los parches hacia arriba también disminuyó, pero los postes fueron más altos para poder descentrarlos de la estructura y así liberar las gradas de su intromisión y no generar barreras visuales. Tanto la unión entre un parche y otro, como la de los mástiles se hacía con cables de acero, que además, no requería de excesiva tracción si lo comparamos con el modelo anterior.

NAENAE BOWLING CLUB

Este pabellón multiusos es el resultado del encargo para Brown Architects LTD de renovar la zona polideportiva de la ciudad de Naenae (Nueva Zelanda). La idea era hacer un edificio que donde se los clubs deportivos pudieran realizar sus actividades y competiciones de boliche, por lo que el área inicial sería la reglamentaria para una pista de 50 x 50 metros cuadrados. No obstante, también era importante que tuviera versatilidad para albergar usos alternativos al deporte y que fuera rentable para el club pudiendo sacarle el máximo partido. La composición formal del edificio sería una caja con un perímetro de vidrio y una cubierta extensa, ligera y traslúcida que mejorara las condiciones interiores para el juego y que se posara sobre el paramento de vidrio, sin llegar a tener una gran presencia que desviara la atención de los jugadores.



51. NAENAE BOWLING CLUB



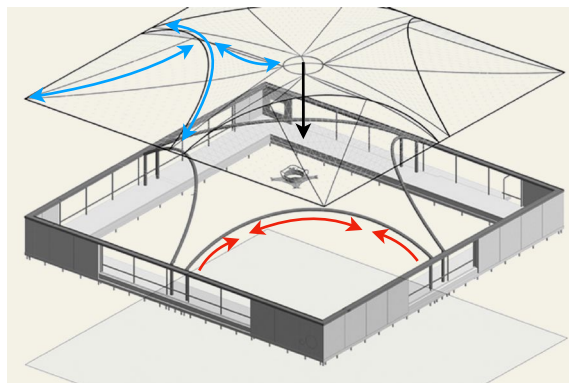
52. PATRÓN VISTA SUPERIOR

La estructura estaba limitada a no tener apoyos intermedios que pudieran entrometerse en el espacio de la pista; la forma más eficiente de cubrir esta distancia sería con una carpa. Dado que la forma de la base era cuadrada se buscaba también un resultado similar para la cubierta y el equipo de diseño se basó en la cúpula *xana-dome* desarrollada por Peter Dann. Aprovecha la forma del arco rebajado para generar tensión en la membrana, y son los cuatro arcos los que trabajan a compresión cruzando parcialmente el espacio. Tienen una sección tubular de acero y se apoyan en unos pilares de sección semejante.

La diferencia con la geometría de *xana-dome* repercute en que hay una cruz que separa la tela en cuatro sectores; al medio es donde se encuentra un gran disco suspendido que se encarga de tensar todos los cables simultáneamente. En principio se observaron problemas de condensaciones en la membrana, pero no se les dio importancia debido a que el pabellón está orientado a ser un espacio más de exterior que de interior, que la fachada de carpintería es practicable en su totalidad y que en el centro de la cruz de la cubierta hay una abertura intencionada precisamente para generar corrientes ascendentes para que el espacio se pueda ventilar rápidamente.



53. PATRÓN VISTA INTERIOR

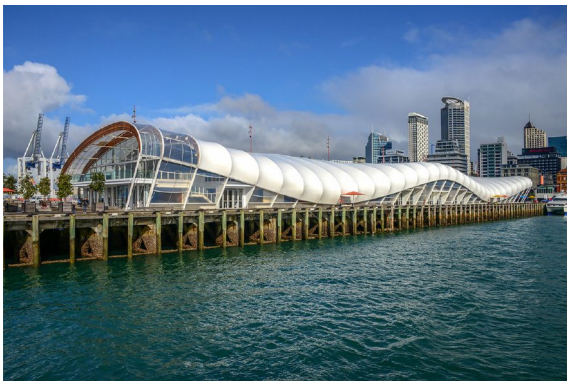


54. DESPIECE DE LA GEOMETRÍA

THE CLOUD PARTY CENTRAL

En la bahía de Queen's Wharf de Auckland se alza esta pieza de arquitectura temporal y polifuncional potenciada inicialmente por el motivo de la Copa Mundial de Rugby de 2011. Se trata de una cubierta longitudinal de 180 metros capaz de albergar a 6.000 personas. Se les pidió a los diseñadores algo sencillo de producir en fábrica y fácil de montar para ahorrar costes, de modo que plantearon una serie de proteicos curvos donde se le aplicaría una lona de PVC a modo de cubierta como si estuvieran desarrollando una nave industrial. Para que no comprometer la composición formal del edificio a algo tan banal como un túnel de lona, sin tener que alterar las piezas de perfilería tubular mandaron que cada apoyo donde se aguantaban las costillas tendría una longitud diferente. Este sería el único elemento que no se podría fabricar en serie, pero el hecho de cambiar el largo del pilar no representaba una gran inversión adicional.

Así la topología de gusano ya parecía que empezaba a caminar. La variación de los apoyos se hacía a razón de una curva sinusoidal a ambos lados dando como resultado un diseño paramétrico diferenciador y atractivo. La forma en que se torsionaba la membrana con el paso de los pórticos también ayudaba a estrechar las curvas de la tela y que fuera mucho más estable. De nuevo volvemos a encontrarnos el arco (o una forma semejante) para las piezas que están comprimidas por la tela, y esta se comportará como un elemento traccionado. En total el plástico textil cubre 46 celdas o paneles, pero no todo estaba hecho de fibra de PVC blanco; en el extremo donde estaba la doble altura habían dos celdas de EFTE transparente, uno de los últimos materiales plásticos implementados en la arquitectura, que también compone el resto de fachada entre pilares.



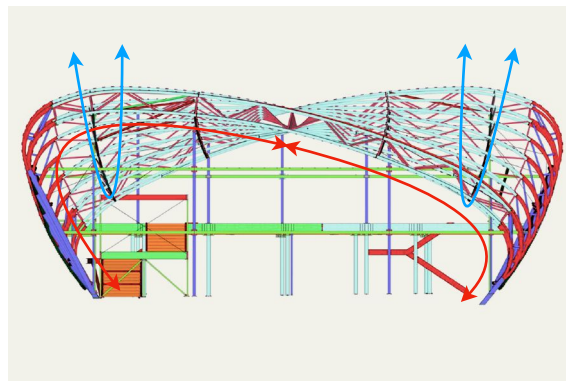
55. THE CLOUD PARTY CENTRAL



56. VISTA LONGITUDINAL



57. INTERIOR DE THE CLOUD



58. INTERIOR DE THE CLOUD

La rigidez de la membrana estaba garantizada por la curvatura cóncava de las costillas en la sección transversal y la forma condas de las celdas en la sección longitudinal. La superficie útil del edificio en su mayoría está en el propio suelo del lugar, no era necesario construir una cimentación. Obviamente los pilares sí que estaban empotrados en el suelo por anclajes y arrostrados entre sí en caso de movimientos horizontales; sobretodo con dirección transversal. El entrepiso lo soportaba complemente la estructura de acero, al igual que todo el sistema eléctrico, de iluminación y de sonido. Para que el volumen no fuera un espacio estanco había microperforaciones en partes de la lona plástica y en la fachada de los extremos de modo que la estructura podría tener una ventilación natural cruzada de punta a punta.

ESTADIO WANDA METROPOLITANO

La eficiencia de las membranas plásticas para cubrir grandes espacios se ve patente en la cantidad de obras masivas en las que se ha utilizado. El ingeniero alemán Mike Schlaich vuelve a hacer uso de las estructuras traccionadas para cubrir el nuevo campo de fútbol para el Atlético de Madrid. Inicialmente es estadio contaba con una única grada en solo uno de sus laterales, pero tras el rediseño los arquitectos encargados del proyecto llevaron a cabo la propuesta de aprovechar todo el perímetro para graderío y poder albergar a 68.000 aficionados. La estructura está confeccionada con un entramado de cables de acero y lámina de PTFE; la cantidad de peso propio que aportan son 6.336 y 92 toneladas respectivamente. A primera vista puede parecer mucho peso, pero no olvidemos que estamos hablando de una estructura que cubre una superficie de 83.000 metros cuadrados; ofreciendo sombra al 96% de las gradas.



59. ESTADIO WANDA METROPOLITANO



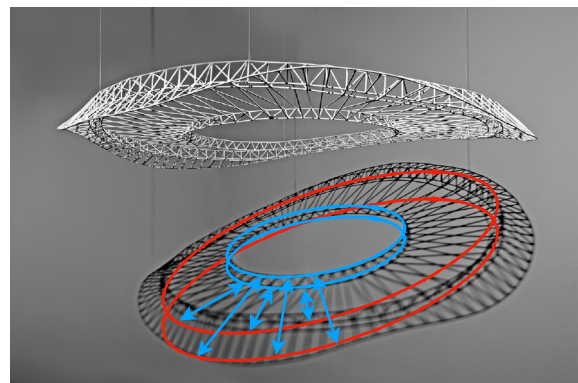
60. VISTA DESDE EL GRADERÍO

Las piezas principales por las que se soporta la cubierta son los dos anillos de acero: el anillo exterior de compresión hecho de una celosía tubular triangular empotrada a la cresta de las gradas de hormigón para soportar las fuerzas horizontales del resto de cubierta, y el anillo interior de tracción constituido por cables. Ambas partes se conectan entre sí por tensores radiales sobre los que va a ir cosida la membrana de polímero. Los 96 radiales de 55 metros cada uno no están situados en el mismo plano, sino que se entrelazan de la parte inferior del anillo exterior a la parte superior del anillo interior y viceversa para generar un patrón de zigzag plegando parcialmente los paneles de la membrana.

La forma en que se pliega la cubierta es importante ya que le confiere una rigidez adicional a la que ya tenía de por sí por la tracción de la estructura; toda la cubierta se convierte en un conjunto de pequeños tramos de paraboloides hiperbólicos. Además, visto desde el centro del anillo traccionado, la membrana plegada de forma convexa se encarga de soportar las cargas gravitacionales y las partes cóncavas soportan las fuerzas producidas por el viento, concretamente las de succión. No es descabellado pensar que se necesitaban 6.000 toneladas de acero para conseguir tensar una estructura semejante.



61. RELACIÓN FACHADA-CUBIERTA



62. ANILLOS ESTRUCTURALES

OBRAS RELACIONADAS



63. FEDERAL REPUBLIC OF GERMANY PAVILION



64. BASKETBALL ARENA DE LONDRES



65. EDEN PROJECT ICE RINK STRUCTURE



66. KHAN SHATYR ENTERTAINMENT CENTER

MÉTODOS DE RIGIDIZACIÓN

Estructuras Transformables

Cuando hablamos de estructuras transformables nos referimos a la capacidad cambiante de una estructura, ya sea en su totalidad o parcialmente. Estas estructuras deben de ser dinámicas desde el propio diseño y son fácilmente identificables porque tratan de suplir una necesidad con este movimiento. En este apartado podríamos volver a incluir parte de las estructuras traccionadas que varían de forma según la tracción; como subcategoría adicional dentro de esta, las estructuras neumáticas cuya tracción esta producida por la presión del flujo interior de aire y son capaces de hincharse y deshincharse a voluntad. ¿Pero y si la estructura no está traccionada? Las estructuras plegadas también tienen que decir mucho al respecto, sobretodo conociendo las propiedades flexibles de los plásticos. Se abarcarán conceptos como algunos métodos de plegado y patrones ligados a la papiroflexia. Lo más interesante de esto es que los esfuerzos en un patrón de este tipo se manifiestan como deformaciones en más de un eje, por lo que sería interesante ser capaces de manipular uno de ellos para contrarrestar la deformación en el otro.

SURI SHELTER

Tras los terremotos de Lorca (Murcia) y Haití, algunos miembros de la constructora española Urbana IDR que habían participado como voluntariado decidieron dar una solución de vivienda para situaciones de emergencia como la que habían visto. Con la participación de la Universidad de Alicante se estableció Suricatta Systems donde desarrollaron el prototipo SURI, Shelter Unit for Rapid Installation (Unidad de Refugio de Rápida Instalación en español). SURI es un sistema modular cuya flexibilidad permite ser montado en poco tiempo, sin herramientas especiales y de igual forma se puede desmontar ocupando el equivalente a un palé de madera. Se puede usar tanto para viviendas unifamiliares, centros de salud, hospitales de campaña, quirófanos, oficinas y para cuarteles del ejercito. La unidad tipo ofrece un espacio de 2,7 x 1,3 x 2,44 metros cúbicos interiores, pero pueden anexarse sucesivamente o de forma paralela más unidades para generar un espacio mucho más amplio.



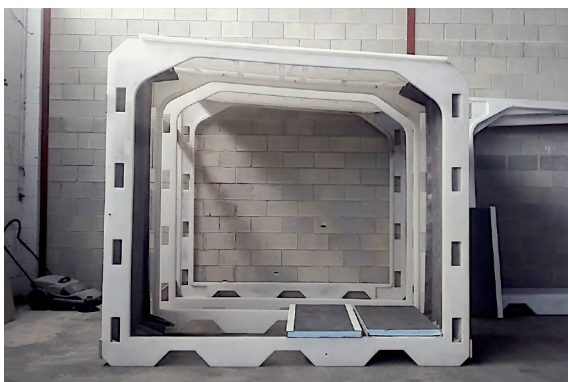
67. RELACIÓN FACHADA-CUBIERTA



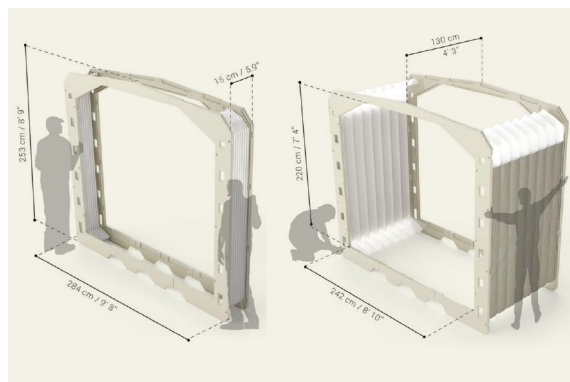
68. ANILLOS ESTRUCTURALES

La estructura consiste en dos marcos de plástico unidos por una membrana polimérica plegada en forma de bóveda de cañón de tres aristas: las dos fachadas y el techo. Para impedir que vuelvan a plegarse o que se desplomen por el efecto pórtico se introducen las piezas de suelo, techo y zócalo, que además de hacer el espacio funcional arriostra la estructura de los marcos plásticos. Todas las piezas están dispuestas para que sea el pórtico el que aguante la mayoría de los esfuerzos, teniendo el punto más débil con dichas cargas en los emperamientos con el vano y la cara interior de los apoyos laterales.

Se prevé unas cargas estimadas de uso de 200 kg/m^2 , 100 de peso en cubierta y otros 100 kg/m^2 de fuerza lateral del viento. Para mejorar las propiedades térmicas de la lona plegada, una vez desenrollada dispone de un compartimento para rellenarlo des material disponible en el emplazamiento, pensado sobretodo para tierra o arena. Los apoyos son ajustables en altura porque no se puede prever en que condiciones se va a apoyar la unidad; son tubos de polietileno de alta densidad ubicados a cada lado del pórtico. El pack donde viene el modulo incluye una capa de aislamiento térmico y velcro de alta resistencia para cubrir las juntas entre módulos.



69. ANILLOS ESTRUCTURALES

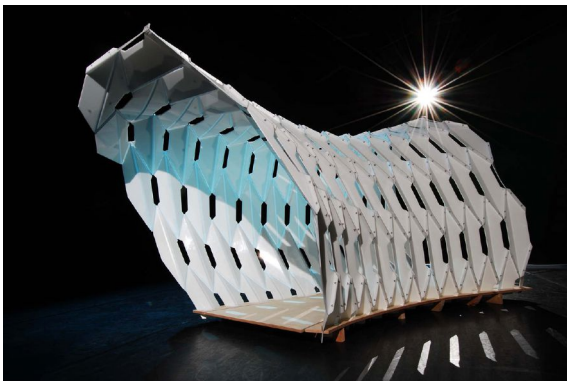


70. DESPLIEGUE

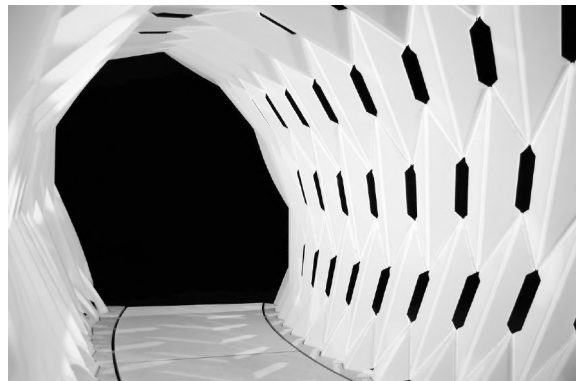
GREAT WHITE: PLASTIC FOLDED STRUCTURE

Con esta pieza los estudiantes de la Universidad de Michigan se presentaron en la centésimo primera ACSA Conference. Querían desarrollar una tipología estructural a partir de las nuevas tecnologías tanto en cuestión de herramientas informáticas y de producción. Valiéndose del cálculo paramétrico y de una fresadora mecánica CNC empezaron a diseñar un pabellón experimental, pero también pensaron en probar con materiales alternativos a los habituales en este tipo de maquinarias, de modo que cambiaron los paneles aglomerados de madera por planchas de polietileno de alta densidad. La forma iba a estar completamente condicionada por el algoritmo introducido por el ordenador pero iba a estar dividido en partes más manejables para que ellos mismos se pudieran encargar de su producción y montaje; veían importante aprender directamente de la experiencia del desarrollo manual.

La metodología de montaje pasaría por un proceso de plegado y la posterior unión de piezas con tornillería. El plástico se prestaba muy bien a estas propiedades por lo que su propuesta no se vería limitada por la materialidad. La información que debían introducir al ordenador era una forma, una superficie sobre la que se dibujarían las distintas celdas con métodos paramétricos. Como la vista previa de la solución se reflejaba inmediatamente sobre la pantalla, tuvieron tiempo de probar con formas sugerentes que ponían en jaque los procesos informáticos, pero se decantaron por un volumen hiperbólico pues así podrían probar los límites tanto de la estabilidad del diseño estructural como los del plástico. Una vez fracturada la superficie en celdas trapezoidales planas, se suprimían las áreas que peor iban a trabajar estructuralmente así dejaría de ser un túnel completamente ciego.



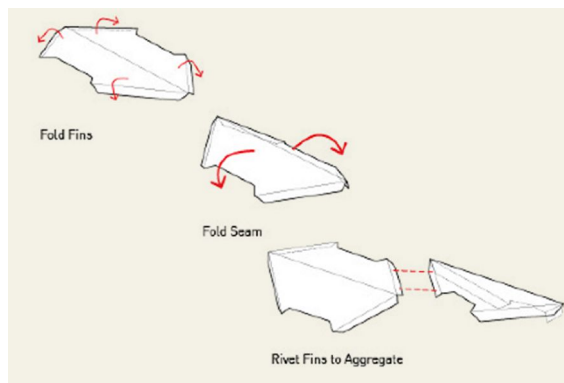
71. GREAT WHITE: PLASTIC FOLDED STRUCTURE



72. CARA INTERIOR



73. ARISTAS



74. MÉTODO DE PLIEGUE

Se le estipuló al programa que redujera las uniones a tres en el plano transversal (120° , 90° y 60°) y otros cinco en el plano tangente a la curva (120° , 110° , 90° , 70° y 50°). De este modo el diseño de las uniones se reduciría a 15 tipologías para poder construir un volumen tan complejo. Antes de pasar la estructura al plano físico y tangible, introdujeron el modelo 3D al un programa de calculo estructura y se cercioraron de que las tensiones se concentraban en las uniones. Para solventarlo la forma en que se atornillan unas celdas a otras es por medio de una arista o solapa. Este trozo de excedente de plástico era por donde se pasaban los tornillos, doblándose hacia afuera y mejorando tanto la cohesión entre piezas para transmitir las tensiones como su resistencia mecánica al soportarlas.

MOON - ESTRUCTURA TEMPORAL DE TENSEGRIDAD

Se trata de un trabajo desarrollado por estudiantes de la Universidad Científica de Tokyo que buscaban experimentar con estructuras altamente ligeras para un pabellón temporal. Como resultado obtuvieron una construcción con dos componentes: la lona elástica de fábrica de poliéster y barras tubulares metálicas. El conjunto trabaja con los principios de tensegridad: las barras son los elementos que solo trabajan a compresión simple y la membrana es la que absorbe las tensiones producidas por la tracción. Los extremos de las barras están cosidas por lo extremos a la lona para que la cabeza de cada barra que incrustada y así interactúen ambos materiales. En total hay 131 tubos de compresión de 35 mm de diámetro hechas de aluminio. En ningún momento las barras se tocan entre sí y todas estas comprendidas en el mismo plano vertical paralelo. La longitud se mantiene constante excepto en los bordes de la lona, con piezas más pequeñas para que todos los palillo sobresaliente toquen tierra a la vez.



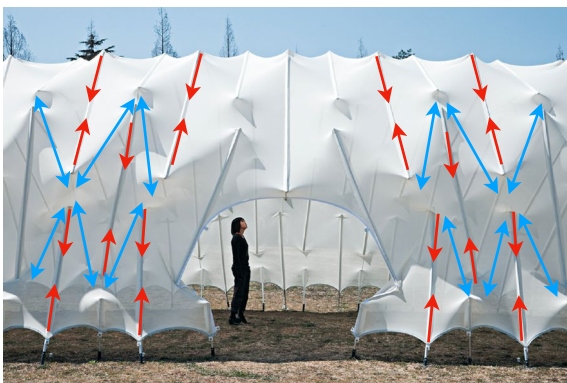
75. MOON



76. ESTRUCTURA DESTENSADA

Las barras no están colocadas de igual forma por la membrana de poliéster, sino que se intercalan con desfases radiales respecto a las contiguas. La colocación de los elementos en esta posición genera dos tipos de topografías en la tela. En primer lugar las áreas entre las cabezas de las barras coplanarias y el punto medio de las barras contiguas absorbe tracciones simples en la dirección longitudinal del edificio. En este punto la membrana funciona como una articulación pues no es capaz de contrarrestar el momento flector en el plano transversal y otorga libertad a la estructura a cambio de alargamientos longitudinales.

Por otro lado, el resto de áreas constituyen pequeños paraboloides hiperbólicos estables al estar arrostrados en dos ejes. Estas zonas son las que mayormente van a rigidizarse a medida que se monta la estructura. La forma de colocarla es sencilla pero se requiere de un equipo de personas para poder alzar el pabellón. Al anclar al suelo los dos lados más largos, la lona expande verticalmente y se estira a lo largo. El espacio interior es de 26 metros de largo, 7 metros y medio de ancho máximo y 4,25 de alto. Gracias a las propiedades de la capa de 0,7 milímetros de poliéster deja pasar la mitad de luz solar y tan solo el 20% de rayos UV.



77. DISTRIBUCIÓN DE BARRAS



78. ESPACIO INTERIOR ABOVEDADO

CARAVANE FLEUR

La necesidad de desplazamiento para el ser humano ha sido una constante a resolver durante años. Llevar la casa a cuestas es una ambición que, por economía o por eficiencia, no se puede hacer, por lo que recurrimos a espacios por lo general más reducidos a los que debemos acomodarnos el tiempo que estemos fuera del hogar. Durante el auge del movimiento de las casas de plástico, Jean-Louis Lotiron y Pernette Perriand-Barsac se encomendaron en la tarea de diseñar una casa de verano móvil alternativa a la típica caravana. El *late motive* iba a ser su tamaño, querían algo lo suficientemente espacioso para ser disfrutable y no echar de menos ninguna de las facilidades de una casa estándar. Pero durante la carretera no sería nada conveniente llevar algo tan voluminoso, y empezar a investigar las capacidades de las casas auto-compactas, es decir, una casa completamente equipada que se pueda mover por tierra, mar o aire y una vez alcanzado el destino desplegarla sin complicaciones.

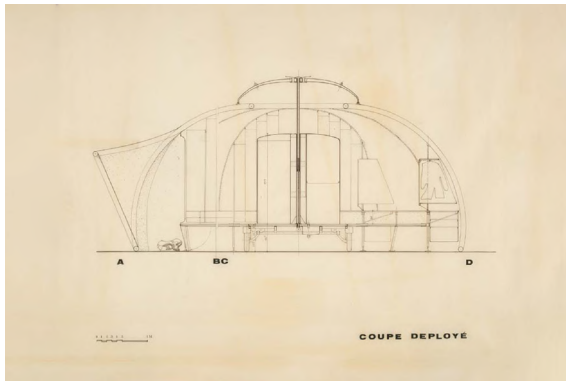
El método de plegado de la vivienda temporal se regía por su geometría. El cubo contenedor podía formar parte del conjunto de modo que las paredes del recipiente con la casa plegada serían el suelo de la misma. Se abatirían y desplegarían como una flor y de un hexágono pasaría a un octógono irregular. La tapa traslúcida del contenedor se extendería para ganar altura y de esta caería un manto inflable semejante a un paraguas que haría las veces de fachada, por lo que esta casa no solo es plegable sino también neumática. El perímetro interior de la cúpula es la zona menos funcional por su limitación en altura debido a la curva de la fachada; se aprovechó esta zona para acabar de rematar el suelo con más elementos hinchables constituyendo las camas o sofás.



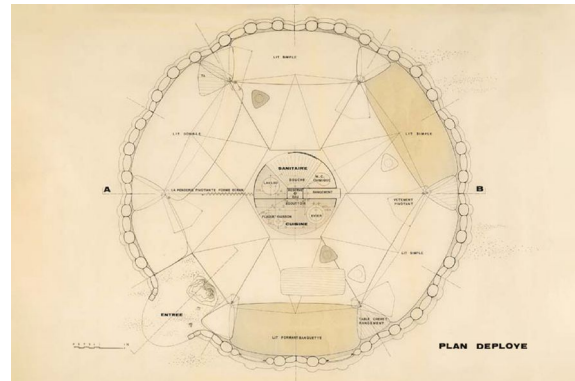
79. CARAVANE FLEUR (MAQUETA)



80. INTERIOR CONCEPTUAL



81. SECCIÓN VERTICAL

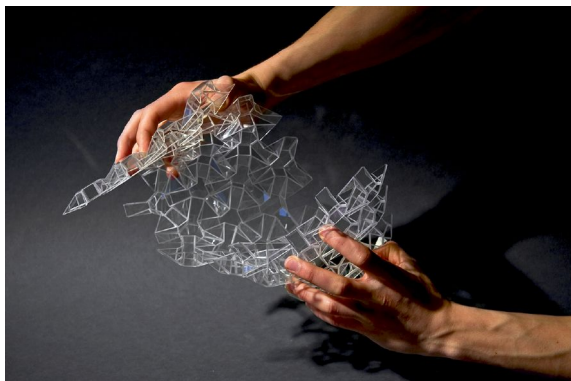
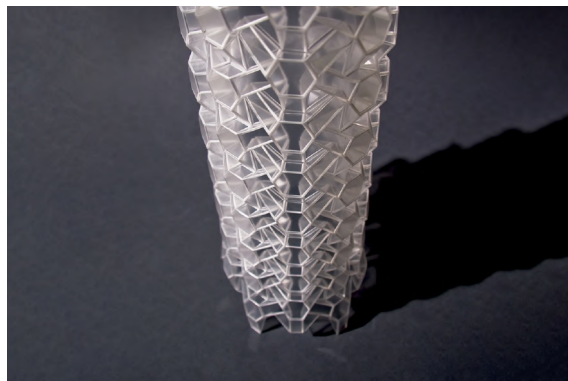


82. DOME EN PLANTA

Los únicos elementos no plegables son los sanitarios, por lo que la casa en su estado de viaje debería almacenar un espacio suficientemente grande como para guardar en su interior las celdas de las zonas húmedas. Finalmente la casa, que iba a tener unos 25 metros cuadrados de superficie construida, se iba a poder encapsular gracias a los principios del origami en un poliedro de 6 metros cúbicos. Aunque no llegaron a desarrollarla, para cumplir con sus exigencias de movilidad, la estructura no podía ser sino de plástico. No solo sería ligera, también muy sencilla de montar porque ni siquiera era necesario atornillar o ensamblar piezas, todas venían ya unidas desplegada o no la vivienda. En apenas 30 minutos, el usuario sería capaz de abrir el paquete, desarrollar el suelo, hinchar las fachada y colocar las muebles para disfrutar de un alojamiento temporal con todo tipo de comodidades.

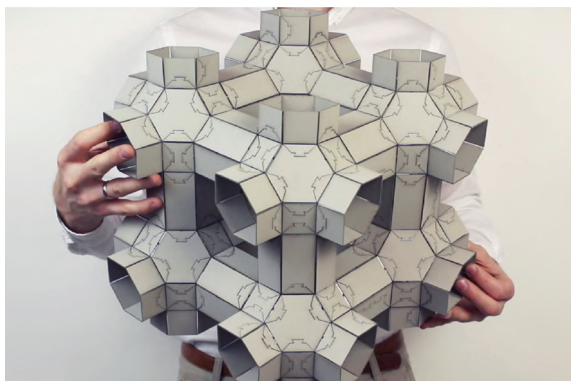
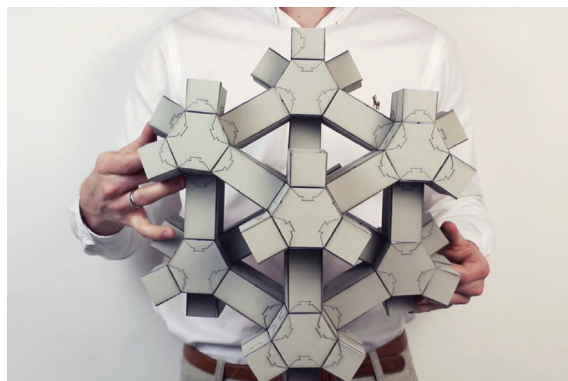
PATRONES RECONFIGURABLES

Los avances en las técnicas de fabricación nos han permitido producir nuevos materiales para la arquitectura y la ingeniería con cualidades sin precedentes. Algunas de ellas aun no han tenido una aplicación real o están en desarrollo, pero se quería introducir en este capítulo un tipo de estructura transformable particular. La capacidad de que un material sea reconfigurable va más allá de los simples mecanismos, articulaciones, tensores o engranajes; se trata de establecer el comportamiento de una superficie o un volumen a partir de pliegues. Se inspira en la diversidad de las geometrías prismáticas y el origami para generar con métodos computacionales y matemáticos, patrones de plisado que con las tensiones adecuadas podrán reconfigurar toda la estructura. Estos patrones no están limitados por la escala, por lo que pueden servir en un gran abanico de campos de estudio.

83. MANEUVRABLE STRUCTURE¹84. MANEUVRABLE STRUCTURE²

Las imágenes de la parte superior corresponden a un patrón investigado por el estudio Moritz Putzier con la colaboración de Axpert Plastic apodado *Maneuvrable Structure*. Este patrón es capaz de cambiar la configuración de una hoja plana en una superficie curva tridimensional estable y flexible. A partir de tres pinzamientos, la estructura puede adoptar una forma esférica reversible gracias a la relación entre los bordes doblados del material y las celdas rígidas, que se transmiten la deformación de unas a otras por todo el material. Este tipo de configuración es de complejidad I, ya que solo tiene dos estados límite: el plano y el curvo, pero ahora veremos piezas capaces de tener más de dos configuraciones.

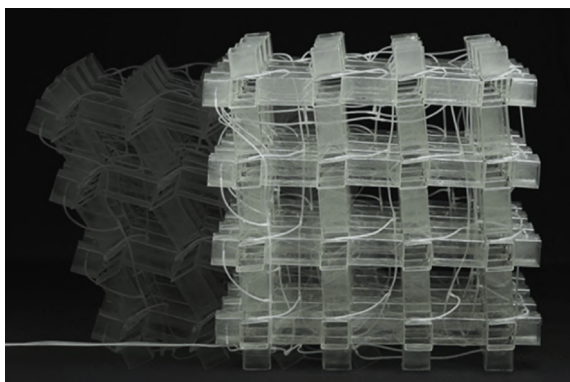
Las imágenes de abajo pertenecen al trabajo de investigación que hizo un equipo de estudiantes de ingeniería y ciencia de la Universidad de Harvard. En su *paper* explican que la los grados de libertad de la estructura depende del poliedro unidad o principal. En el caso mostrado, la unión de varios octaedros truncados nos da tres estados o configuraciones diferentes, oscilando entre el octaedro y el hexágono recto. Podemos imaginarnos estas estructuras con el estado más conveniente para el edificio centrándonos en arriostar los pliegos para forzar esa configuración y olvidándonos de buscar la rigidización del material por su composición.

85. RECONFIGURABLE STRUCTURE¹86. RECONFIGURABLE STRUCTURE²

OBRAS RELACIONADAS



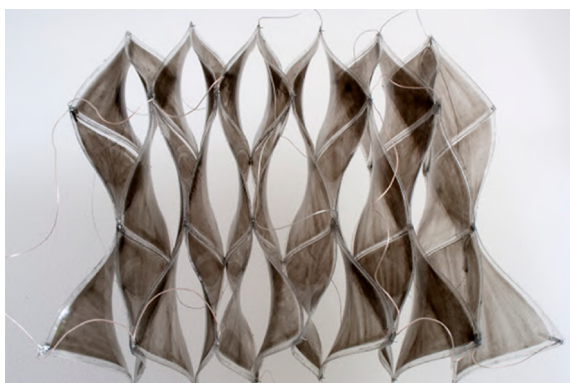
87. 'ON SPACE TIME FOAM' EXHIBITION



88. ORTOGONAL RECONFIGURABLE STRUCTURE



89. LIGHTING SMART FACADE



90. SHAPESHIFT

MÉTODOS DE RIGIDIZACIÓN

Estructuras Horadadas

El concepto de estructura horadada es una interpretación a la siguiente tipología de estudio del presente trabajo. La denominación sugiere que son elementos excavados; un volumen que comprenda una estructura de este tipo va a quedar separada en celdas, hoquedades lejos de la apariencia de túnel o bóveda. Los espacios que encierran tienen una gran complejidad geométrica, pues son superficies aladeadas que ni siquiera pueden desarrollarse mediante rectas diferenciales. Dicho de otra forma, las directrices que generan estas superficies parten ya desde la curvatura. Para poder diferenciarlas y comprenderlas en profundidad haremos uso de la reducción formal, la unidad mínima con la que se puede construir una estructura horadada. Cada una lleva su propia fórmula como etiqueta, que aunque no se vaya a profundizar en un análisis propio del campo de las matemáticas, cabe mencionar que todos los patrones beben de ecuaciones puramente trigonométricas. Se hará una introducción explicando los conceptos básicos y las clasificaciones de las superficies mínimas y luego veremos ejemplos arquitectónicos o modelos tridimensionales para extraer un mayor conocimiento de como funcionan estructuralmente.

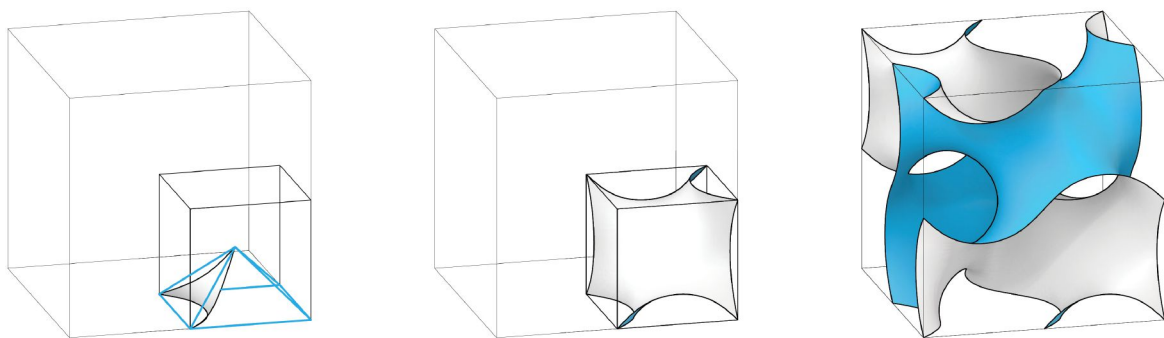
TEORÍA DE LAS SUPERFICIES MÍNIMAS

Se entiende como *minimal surface* a la forma cuya superficie representa la menor cantidad de área necesaria para ocupar un espacio. Podemos decir que son formas que tienen la relación volumen-área más pequeña. No todas las figuras están construidas de la misma forma y, para verlo más claro, tomaremos las formas geométricas primarias que todos conocemos. Podemos imaginarnos un cubo, un cilindro o un cono cuyo volumen sea exactamente el mismo. Si pasáramos a calcular el sumatorio de las áreas de sus respectivas caras, en términos constructivos habría formas que necesitan de más material para edificarse y otras no tanto. Pero la que menos recursos materiales requeriría sería una esfera; no existe otra forma capaz de encerrar el mismo volumen y que emplee menos área.

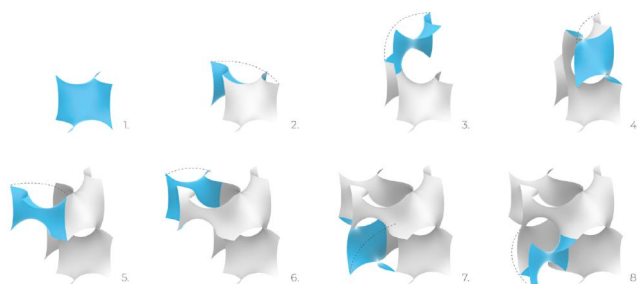
Las superficies mínimas pueden ser vistas en infinidad de ejemplos que podemos encontrar en las estructuras que genera la naturaleza. Por lo general aparecen en los casos que las tensiones superficiales están fuertemente ligadas a la construcción de la forma, como pueden ser las burbujas o gotas de agua. Sin embargo, la utilidad de estas formas no está limitada a la aplicación de tensiones superficiales en escalas reducidas o a los líquidos. En la escala microscópica podemos encontrar también estructuras semejantes en materiales orgánicos incluso poliméricos.

La naturaleza se caracteriza por encontrar siempre la solución más eficiente en cada caso, por hemos podido ver aplicaciones de superficies mínimas primitivas, como puede ser el giroide. El giroide o *gyroid* se caracteriza por soportar grandes tensiones de compresión en lugar de tracción pese a ser un elemento “superficial”. Después de años de investigación, los matemáticos han podido racionalizar estas formas dentro de su disciplina y modelar la base primigenia de las superficies mínimas en ecuaciones. Con estas herramientas, ya podemos crear modelos virtuales para realizar simulaciones y entenderlos tanto en su contexto microscópico como en el macroscópico.

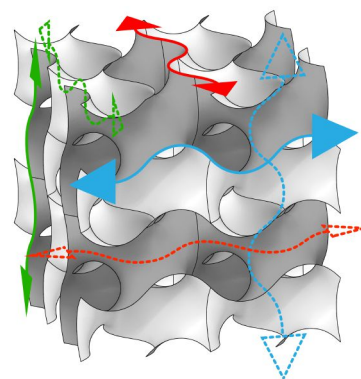
Las superficies mínimas deben tener una curvatura media constante igual a cero, significa que la suma de las principales curvas diferenciales en cada punto se anulan entre sí. También, es fascinante como una forma tan extremadamente compleja de procesar para nuestra capacidad de entender el espacio, sea repetitiva, periódica. Estas configuraciones son producto de una matriz tridimensional del mismo módulo; se pueden recrear a partir de una única pieza pero requieren algoritmos de rotación según donde pongamos el módulo adicional con respecto al anterior para conseguir esa triple periodicidad (una por cada dimensión).



91. UNIDAD ELEMENTAL DEL GIROIDE



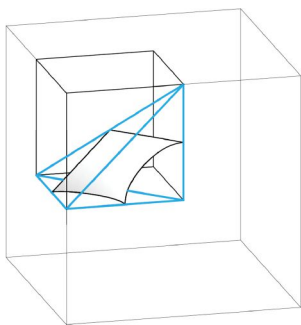
92. EVOLUCIÓN DEL GIROIDE



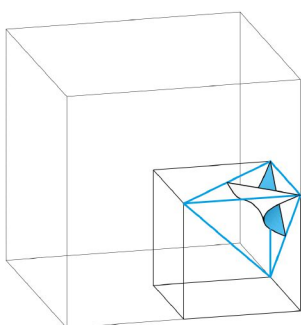
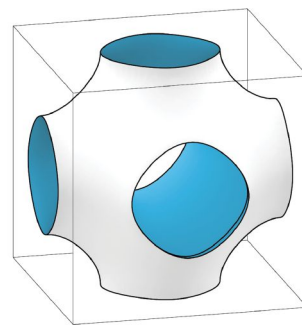
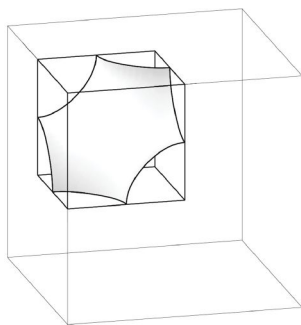
93. PERIODICIDADES DEL GIROIDE

Si siguiendo con el ejemplo del giroide, no se puede saber a priori en qué dirección viajarán las tensiones pues no se ve a simple vista hacia dónde tiende la superficie. Para saber más sobre cómo se puede comportar una de estas piezas, a través de secciones examinamos las periodicidades que comentábamos. Los huecos son canales sinuosos pues en las secciones aparecen delimitados por curvas trigonométricas, pero lo más curioso es que si seguimos cambiando la altura de la sección la curva sinusoidal cambia de dirección 90° dentro del mismo plano. Si continuáramos cortando el giroide volvería a cambiar la dirección de la línea de sección sucesivamente. Aplicando esta metodología a los cuatro planos ortogonales genéricos de un espacio cartesiano, observamos que sucede exactamente el mismo patrón en cada uno de los planos.

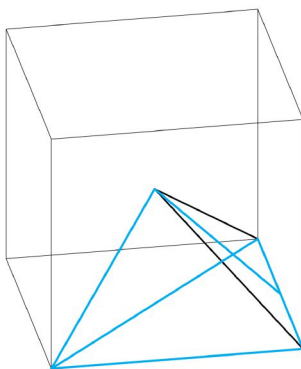
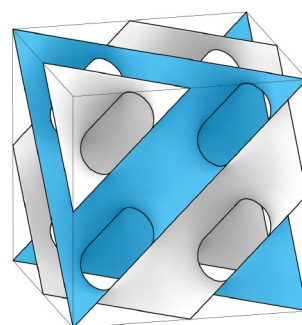
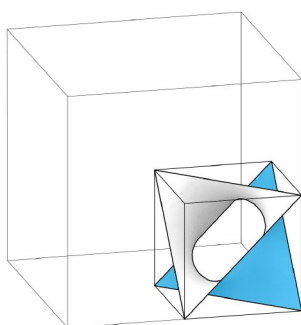
En situaciones donde una estructura con una sección de densidad convencional colapsaría por rotura, la estructura a base de capas con fibras en distintas direcciones mostraría un comportamiento de deformación y colapso que sucedería más lentamente capa por capa. La topografía del elemento dispersaría rápidamente la energía de deformación que, cuanto más puntual fuere el área donde se aplique la fuerza, más eficiente la repartiría por su interior. Por esta razón es que los giroides tienen muy buen comportamiento frente a impacto. También tras este ejercicio podemos sacar en claro que esta superficie mínima es isotrópica, la forma en la que absorbería la energía es la misma en todas las direcciones. No es de extrañar que la industria espacial, haya copiado el patrón que reside en nuestros huesos, en alas de insectos o en los plásticos más resistentes para producir nuevos materiales de construcción. Por ahora no hay muchas aplicaciones, aunque veremos unas pocas, la más reconocible sería para relleno de piezas en entornos de impresión 3D, cuya tecnología sería la más idónea para traernos estas formas al mundo físico y material.



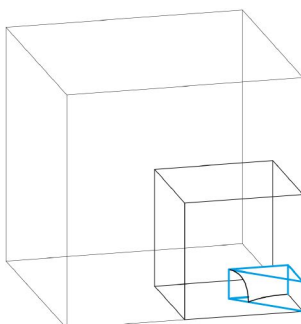
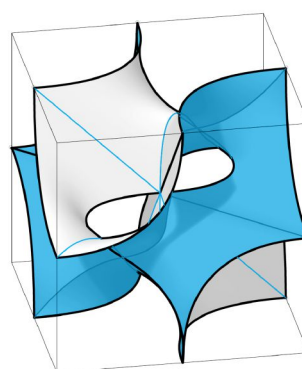
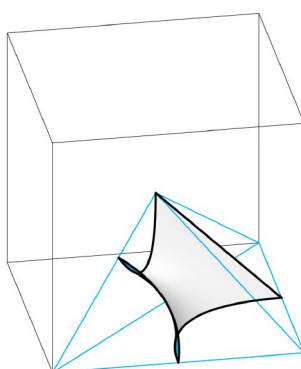
94. SUPERFICIE SCHWARZ PRIMITIVA



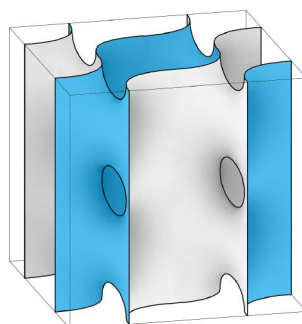
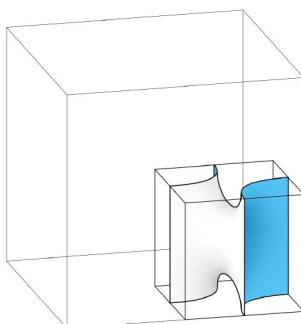
95. SUPERFICIE SCHWARZ DIAMANTE



96. SUPERFICIE SCHOEN



97. SUPERFICIE SCHERK



CORAL-LIKE PAVILION

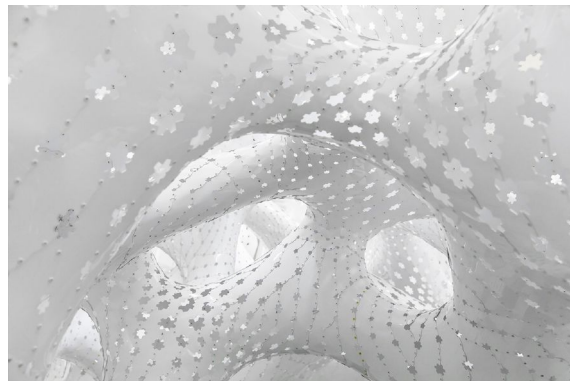
Este diseño tiene un nombre bastante representativo de lo que es; Marc Formes llevó esta maqueta a la segunda edición del Art and Architecture Triennial de Brujas donde fue la primera vez que lo enseñaba en un evento público. Parte de la exhibición trataba de explorar el alzamiento de las formas generadas por procesos computacionales. Su obra también ha pasado por la FRAC Centre de Orleans, exhibición cuyo *late motiv* era Liquid Architectures. Marc explica que la forma orgánica y fluida de la pieza refuerza la noción de que la arquitectura debe ser “estrictamente determinada e inmutable”.

Los ojeadores del evento la califican como una clara demostración de la manera en que el diseño digital y las herramientas artesanales pueden crear nuevas aproximaciones a la arquitectura. La membrana, que solo tiene un milímetro de espesor, sería capaz de aguantar un tránsito moderado de gente gracias a su curvatura. Lo cierto es que ya hemos visto bien las capacidades de las superficies mínimas, y es tal como lo corrobora el estudio encargado del diseño, se consigue como resultado una estructura que está constantemente curvándose y cambiando de dirección con un comportamiento óptimo en relación a su peso y densidad.

En este caso la pieza está apoyada en el suelo, pero se pueden encontrar obras similares del mismo diseñador en Orange Country Convention Center de Orlando, pero en este caso estaría suspendida del techo sin importar de donde vengan las tensiones o en que dirección vayan. Su mayor obra cuenta con 4.600 bandas de lámina corrugada de aluminio. La inspiración del autor provino de su fascinación por las formas orgánicas de la naturaleza potenciada por el conocimiento y la dedicación de Frei Otto en el campo de las estructuras.



98. CORAL-LIKE PAVILION



99. CURVATURAS

MINIMAL COMPLEXITY

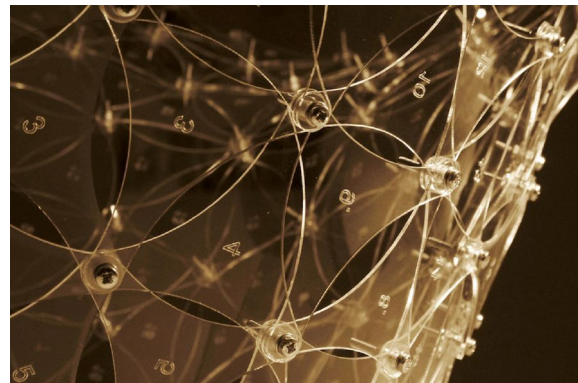
Como ganador del último certamen de Repeat Competition, Vlad Tenu ha sorprendido con su conjunto de obras titulada “Minimal Complexity”. Tanto el nombre como el estilo de las esculturas beben del concepto de superficies mínimas, y es que Vlad, es otro ejemplo de que es posible llevar a cabo la complejidad de las formas digitales computarizadas. Con la lógica de eficiencia de materiales, belleza estética, robustez estructural y elegancia en los detalles, el diseñador abre una colección de esculturas que ha sido capaz de posicionarse por encima de los otros setenta y dos participantes procedentes de todo mundo.

Ha creado una estructura de superficie mínima periódica usando solo 16 piezas diferentes. Su último proyecto se exhibió en la exposición Constructing Realities en la ARUP Phase2 de Londres. Su estudio sobre estas composiciones le ha llevado incluso a redactar el artículo “Superficies mínimas como sistemas autoorganizados” que la presentó en la Conferencia ACADIA de Nueva York. Ya estaba ubicado en el mundo académico al haber trabajado en el Bartlett como asistente del departamento de Tecnologías Aplicadas durante el tiempo que estuvo en la Msc AAC.

Es interesante además como trata a las propias superficies con el despiece y el diseño de los componentes. Al trabajar con superficies mínimas a una escala importante, le cedía la parte de ornamentación a la materialidad y las uniones entre las piezas más pequeñas, que eran tan expresionistas como lo minimalista de las curvas. A día de hoy sigue desarrollando nuevas piezas dentro del estudio arquitectura Surface Architects conocido ser uno de los que más galardones ha conseguido con sus diseño en Londres.



100. MINIMAL COMPLEXITY



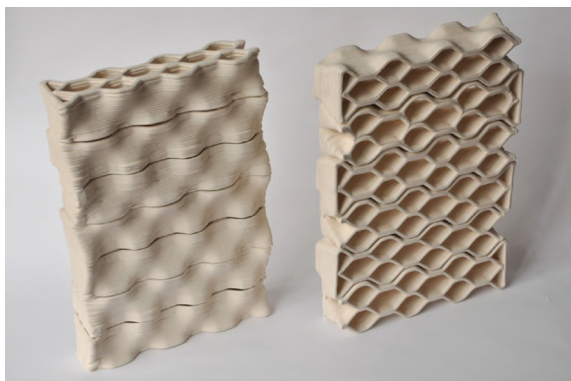
101. COMPONENTES

BUILDING BYTES

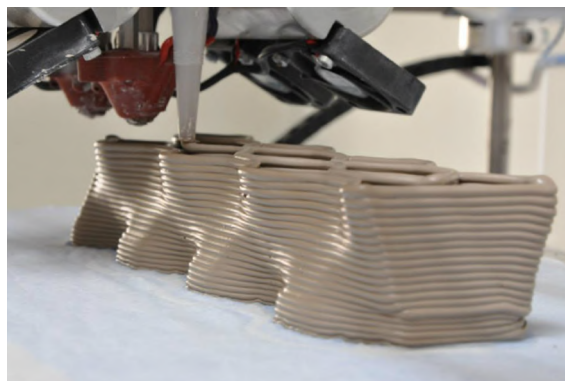
Esta es una gran aproximación a la industria de la impresión 3D al sector de la ingeniería y la arquitectura. Quizás no estemos hablando de edificios enteramente impresos en hormigón (que los hay), pero sin duda hacer que el material cerámico primigenio, como es el ladrillo, tenga nuevas capacidades es todo un logro. El diseño está completamente alejado del típico paralelepípedo al que estamos acostumbrados, pero gracias a la nueva geometría los ladrillos tienen mayor versatilidad y son más funcionales.

Primero que todo, pesan menos, la distribución en celdas pseudo-hexagonales distribuye mejor el material, emplea menos recursos y resulta una forma más eficiente de distribuir tensiones. Como se estaba diciendo, pese a tener menos masa es más resistente y se ha mejorado la forma del aparejo. En posición vertical a sogas la superficie exterior queda rugosa y ondulada y en caso de adosarle una capa adicional las piezas encajaran unas con otras cohesionando el conjunto. En el aparejo a panderete se aprovecha esto mismo, impidiendo el deslizamiento horizontal y aumentando el área de contacto.

Hay varios modelos de ladrillo pues la empresa se ha preocupado de que las formas facilitaran la construcción de elementos arquitectónicos recurrentes, como puede ser cúpulas, bóvedas, torres e incluso columnas. Cambia tanto el perímetro exterior del prisma como la densidad y la distribución de las celdas interiores. Hay maquetas donde han llegado a probar los ladrillos para general superficies hiperbólicas verticales. Es una innovadora técnica de fabricación y de construcción sin dejar de ser accesible a todo el mundo, válido para cualquier tipo de edificio.



102. BUILDING BYTES



103. PROCESO DE IMPRESIÓN

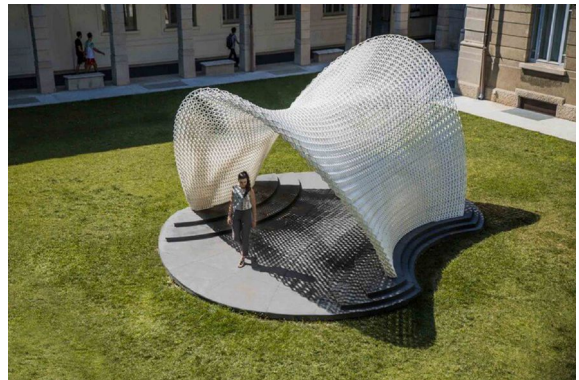
OBRAS RELACIONADAS



104. ARCHITECTS OF AIR'S MONUMENTAL LUMINARIA



105. SCIENCE MUSEUM



106. TRABECULAE PAVILION



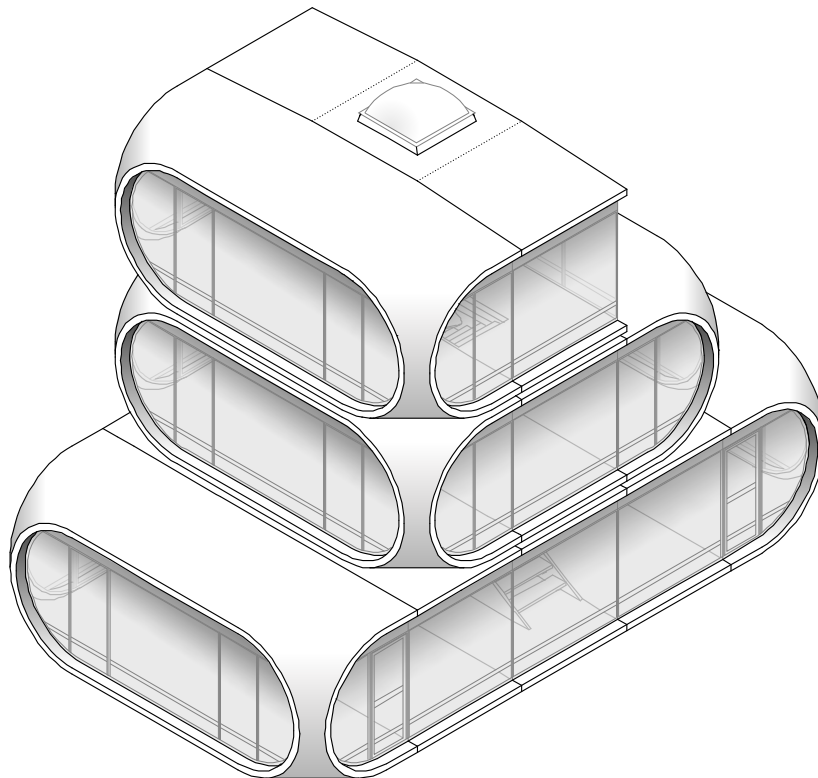
107. LILAS PAVILION

PROPUESTA DE DISEÑO ESTRUCTURAL

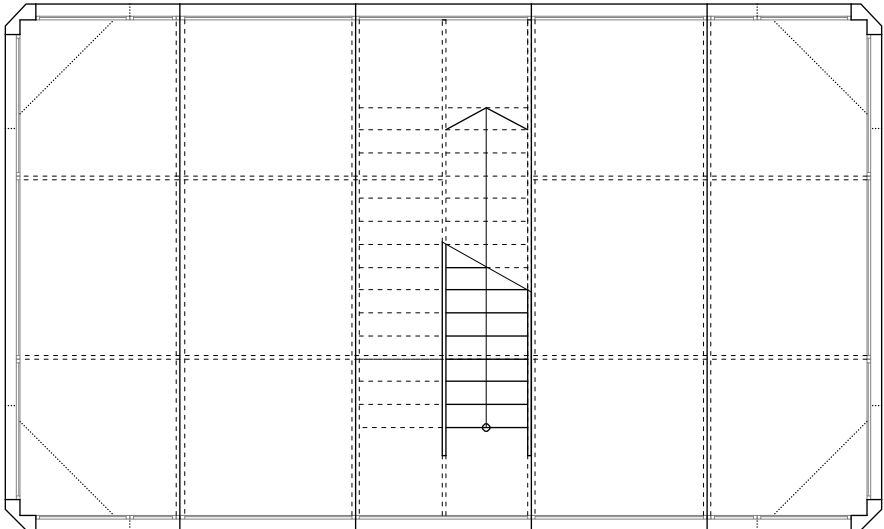
Programa

Procederemos a desarrollar nuestra propia solución estructural una vez analizadas las diferentes vertientes de plástico, sus propiedades y sistemas de rigidización. En las obras usadas en los ejemplos podemos ver una constante y es que difícilmente una estructura de plástico ha llegado a constituir un edificio de más de una altura. Adaptaremos la tipología modular del Venturo CF, manteniendo el mismo programa y usos pero añadiendo nuevas plantas. Se partirá del diseño original, en su configuración alargada, y aprovechando la propiedad modular del Venturo, variaremos el área de las plantas superiores para asegurarnos que no estamos diseñando una estructura sobrecargada. Tras plantear el programa y habiendo modelizado los pórticos, comprobaremos el cumplimiento de la normativa española CTE referente al apartado estructural, asegurándonos que la estructura de plástico cumpla a Estados Límite Últimos y a Estados Límite de Servicio.

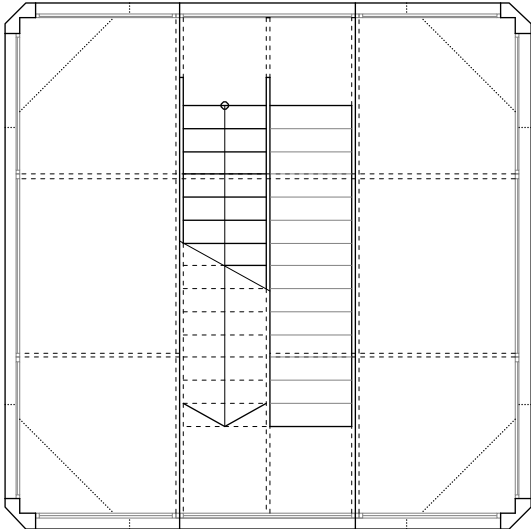
ISOMETRÍA



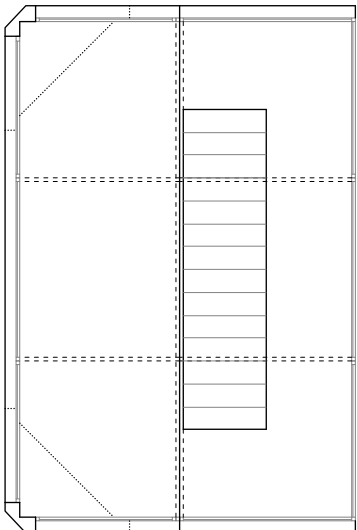
PLANTAS



PLANTA BAJA



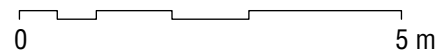
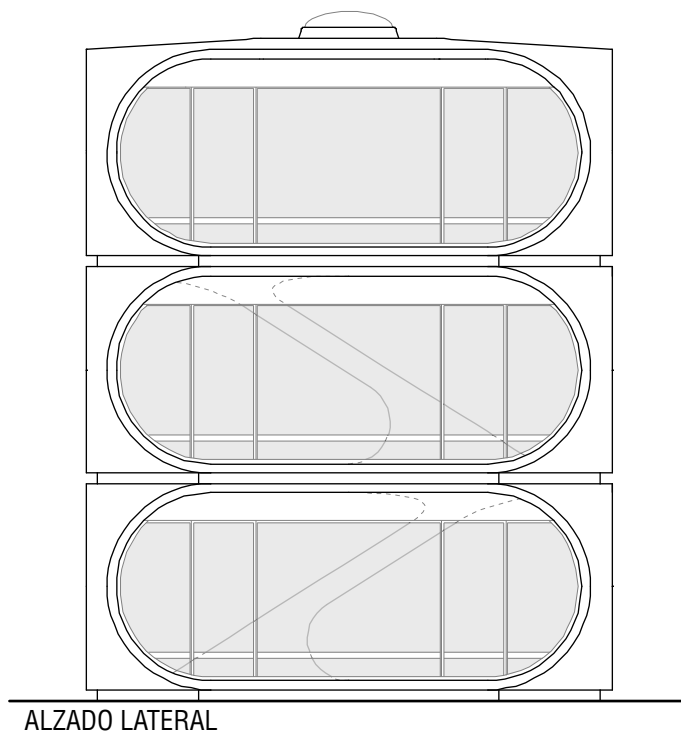
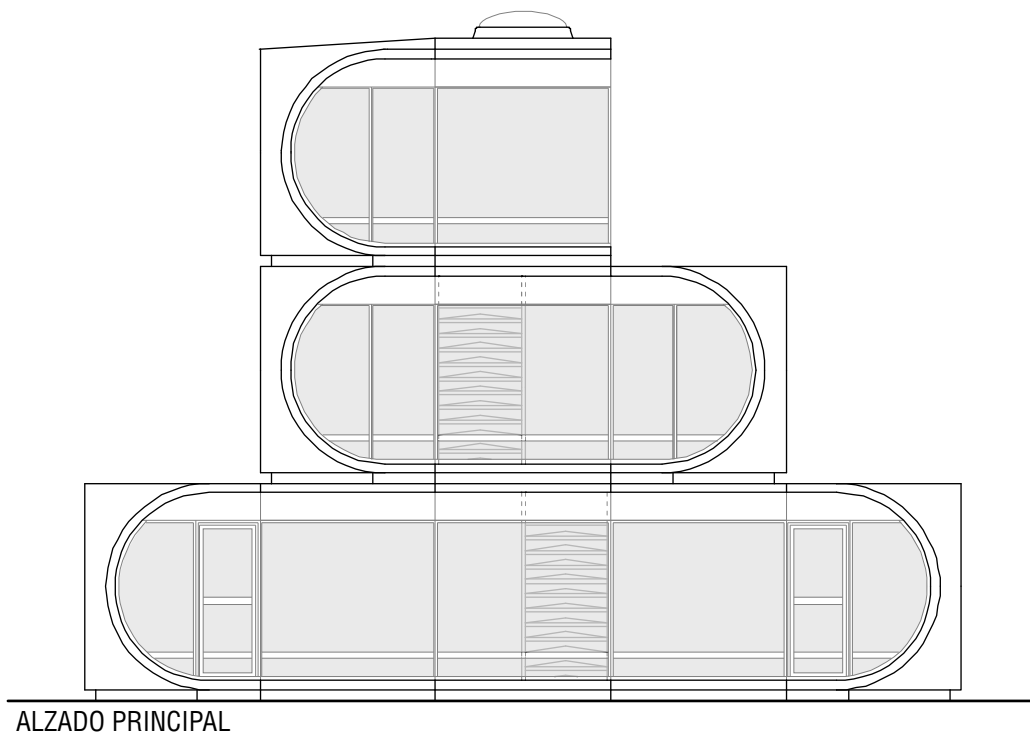
PLANTA PRIMERA



PLANTA SEGUNDA



ALZADOS



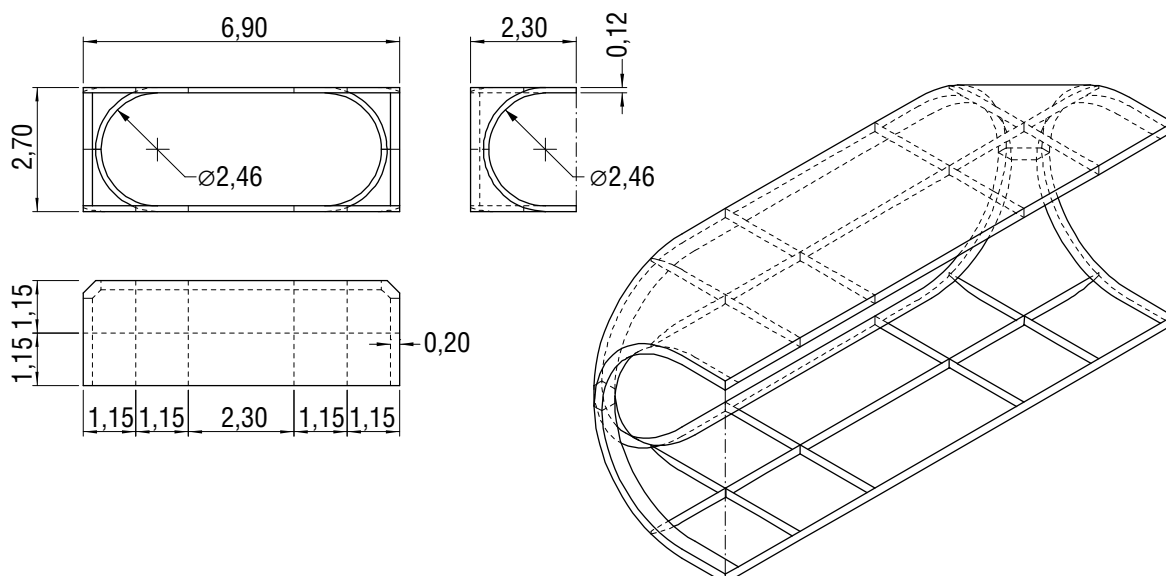
PROPUESTA DE DISEÑO ESTRUCTURAL

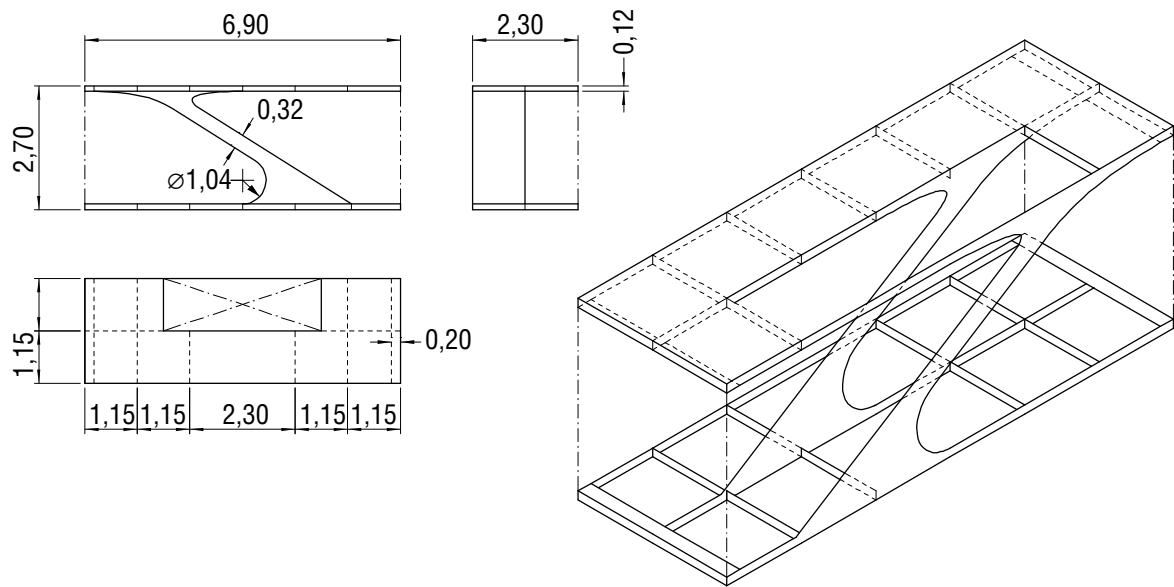
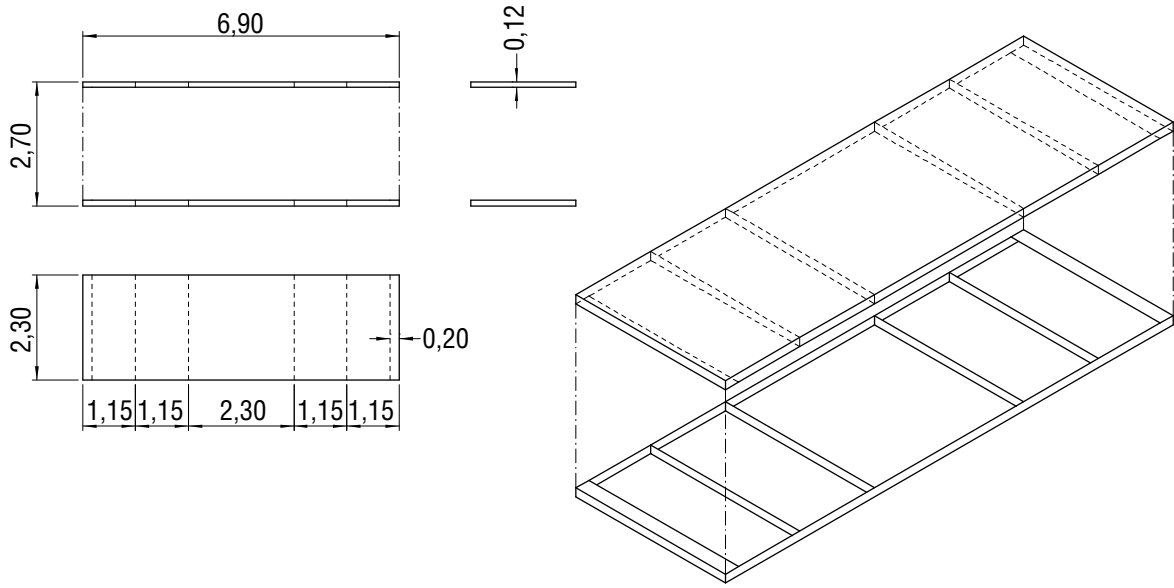
Modelización

Para replicar virtualmente el comportamiento que debería tener un material plástico se va a usar una modelización en caras o *shells* para mantener la cohesión que tendría el material, presente en toda la estructura. Existirán cuatro tipos de secciones, a saber: para las nervaduras, la membrana y la perfilería tubular o maciza. El elemento principal que va a soportar las cargas serán las nervaduras, que pueden disponerse de varias formas. En primer lugar los nervios interiores de las piezas de poliéster son elementos longitudinales que además conforman el borde de la pieza por donde se hace la unión. Tenemos también nervios curvos en fachada, ubicados en las esquinas de cada planta que funcionarán como pilares que, a diferencia de como suele ser, no funcionarán a compresión. Por último en esta categoría, los nervios diagonales para el servicio de la escalera que servirá de punto de apoyo intermedio y electo vertebrado del edificio. El diseño de las piezas se ha basado en las imágenes encontradas de la obra original y se han dispuesto los nervios y elementos de refuerzo de la misma forma para replicarla, contraponiendo siempre el nuevo diseño a la versión anterior. A continuación se mostrarán las diferentes piezas categorizadas según su material de construcción.

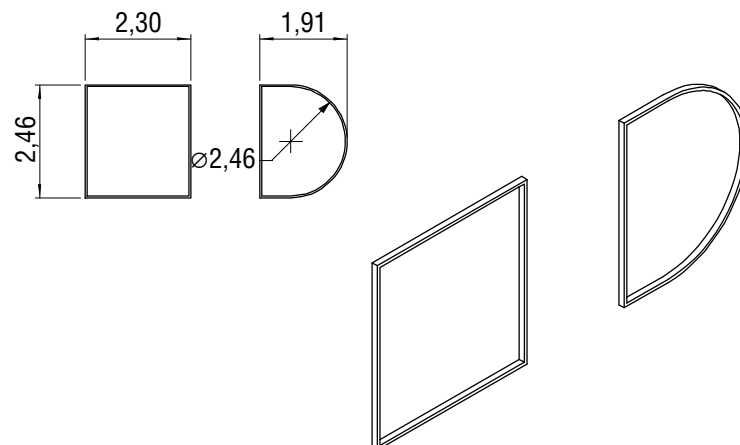
DESPIECE

I. COMPONENTES PLÁSTICOS

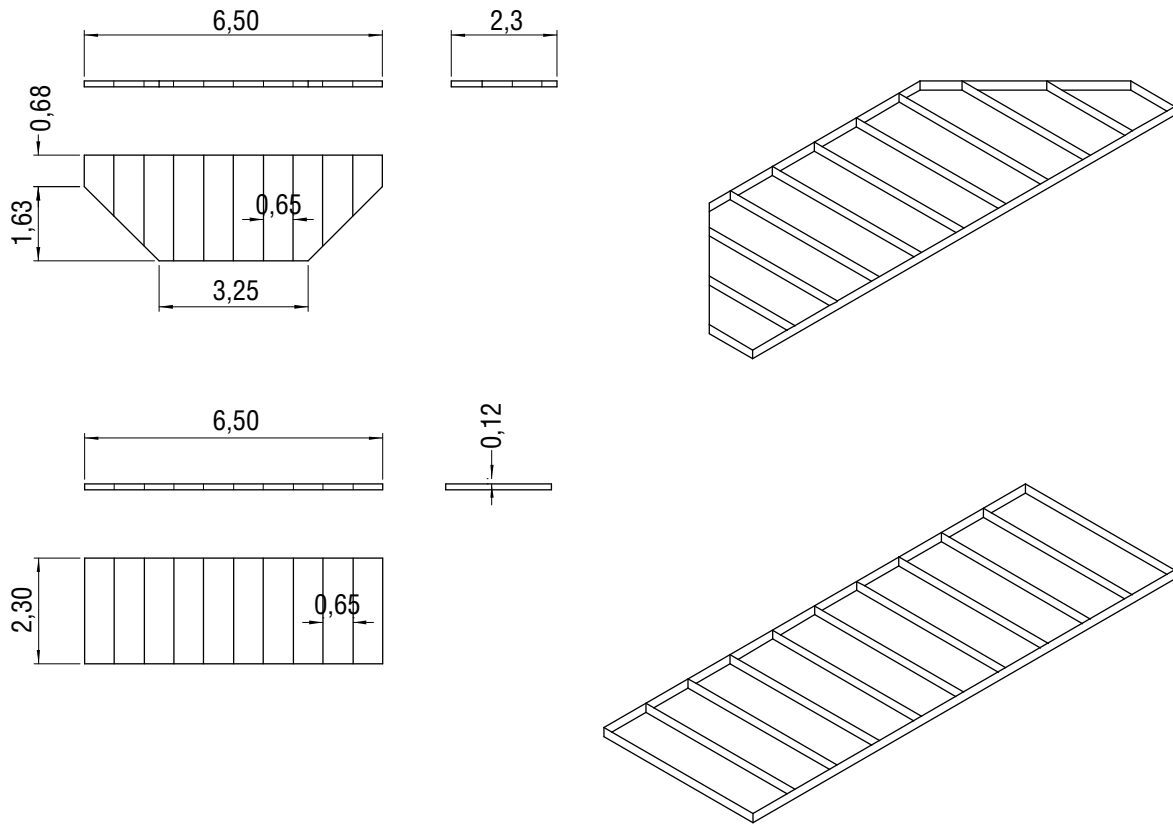




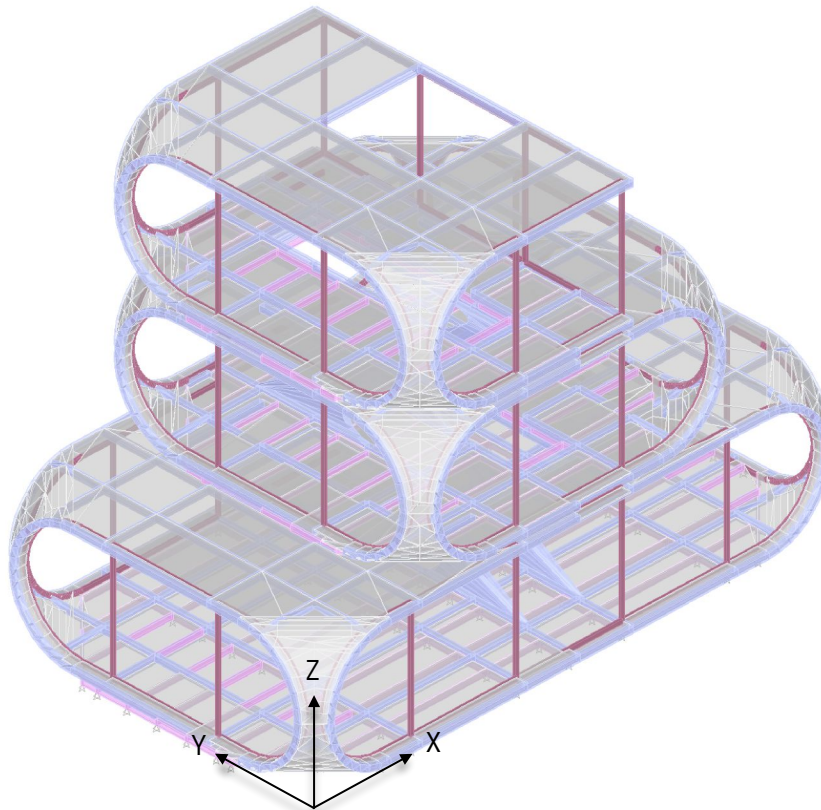
II. CARPINTERÍAS



III. RASTRELES



DISEÑO ESTRUCTURAL EN SAP2000



DATOS DE ENTRADA

Las secciones también pretenderán ser similares a lo visto en la obra de Matti Suuronen, pudiéndose aumentar posteriormente para cumplir con las exigencias de la Normativa Española. Siendo continuistas, nos serviremos de poliéster reforzado con 35% en fibra y estableceremos un régimen de trabajo a una temperatura de no más de 75 °C. Las carpinterías son de sección tubular rectangular y es el único elemento lineal a compresión de la estructura. El resto como se ha modelizado como una 3Dcara, solo concretaremos su espesor.

Tabla 4. Material de Elementos Finitos Superficiales

Material	Pieza Tipo	Espesor (mm)	Densidad (kg/m ³)	Módulo Elástico (N/mm ²)	Coefficiente Poisson
Poliéster	Nervios	100	2.000	13.700	0,33
	Membrana	20	2.000	13.700	0,33
Aluminio	Rastreles	20	2.600	69.637	0,33

Tabla 5. Material de Elementos Finitos Lineales

Material	Pieza Tipo	Dimensiones (mm)	Densidad (kg/m ³)	Módulo Elástico (N/mm ²)	Coefficiente Poisson
Aluminio	Carpinterías	50 x 80, e = 5	2.600	69.637	0,33

Para la estimación de cargas nos valdremos del documento DB-SE-AE del Código Técnico. El programa ya contempla el peso propio de la estructura, pero tendremos que introducir manualmente el resto de cargas. Como el proyecto gira entorno a la polifuncionalidad y los espacios diáfanos, no hay una disposición concreta del mobiliario ni de la tabiquería; no obstante según la Normativa se puede adjudicar 1 kN/m² a las superficies útiles de una vivienda en dichas circunstancias. Está será nuestra carga permanente donde incluiremos el resto de materiales constructivos y el mobiliario. Originalmente se intuye que los acabados eran de plástico por ello el peso debería ser inferior, pero para darle mayor versatilidad al nuevo diseño nos acogeremos a los datos ofrecidos por el CTE. Estas cargas permanentes se incluirán en el modelo como 3Dcaras virtuales, sin peso propio ni rigidez pero capaces de transmitirle los esfuerzos de las cargas que en ellas se ubican. También se aprovechará la membrana virtual para introducir las acciones de uso.

Por otro lado el viento se puede considerar una fuerza de 0,5 kN/m² como dato general para todo el territorio español. No apoyará directamente en la fachada, pues al ser completamente de vidrio, será el nervio curvo incrustado en los alzados el que recibirá la carga repartida equivalente a la que hubiese en toda la fachada. Otra carga variable será la de nieve para un edificio que se encuentre menos de 1.000 m de altura sobre el nivel del mar. Finalmente la carga accidental por sismo no tiene unos valores orientativos y se ha establecido que el edificio se ubicaría en la zona de Alicante, sobre un terreno cohesivo Tipo III y oscilaría en el modo de vibración 1 con un amortiguamiento del 5%. Cada tipo de carga tendrá un coeficiente de mayoración correspondiente a su tipología para la comprobación de Estado Límite Último de la estructura y paralelamente se usarán coeficientes de simultaneidad, manteniendo todas las cargas permanentes y solo una de tipo variable, como acciones características principales.

Tabla 6. Acciones y Coeficientes de Carga

Tipo de Acción	Nombre	Fuerza	Coef. Mayoración	Coef. Ψ_0 - Ψ_1 - Ψ_2
Permanente	Peso Propio	1,0 kN/m ²	1,35	-
Variable	Uso	2,0 kN/m ²	1,5	0,7 - 0,5 - 0,3
	Viento (X, Y)	0,5 kN/m ²	1,5	0,6 - 0,5 - 0
	Nieve	1,0 kN/m ²	1,5	0,5 - 0,2 - 0
Accidental	Sismo (X, Y)	2,37 - 1,86 - 1,63 kN	-	-

PROPUESTA DE DISEÑO ESTRUCTURAL

Cálculos

Antes de mostrar los resultados ofrecidos por el programa elegiremos los más desfavorables en cuestión de resistencia y aptitud al servicio del conjunto de combinaciones y nos basaremos en esas envolventes para explicar el comportamiento de la estructura.

Tabla 7. Combinación de Hipótesis

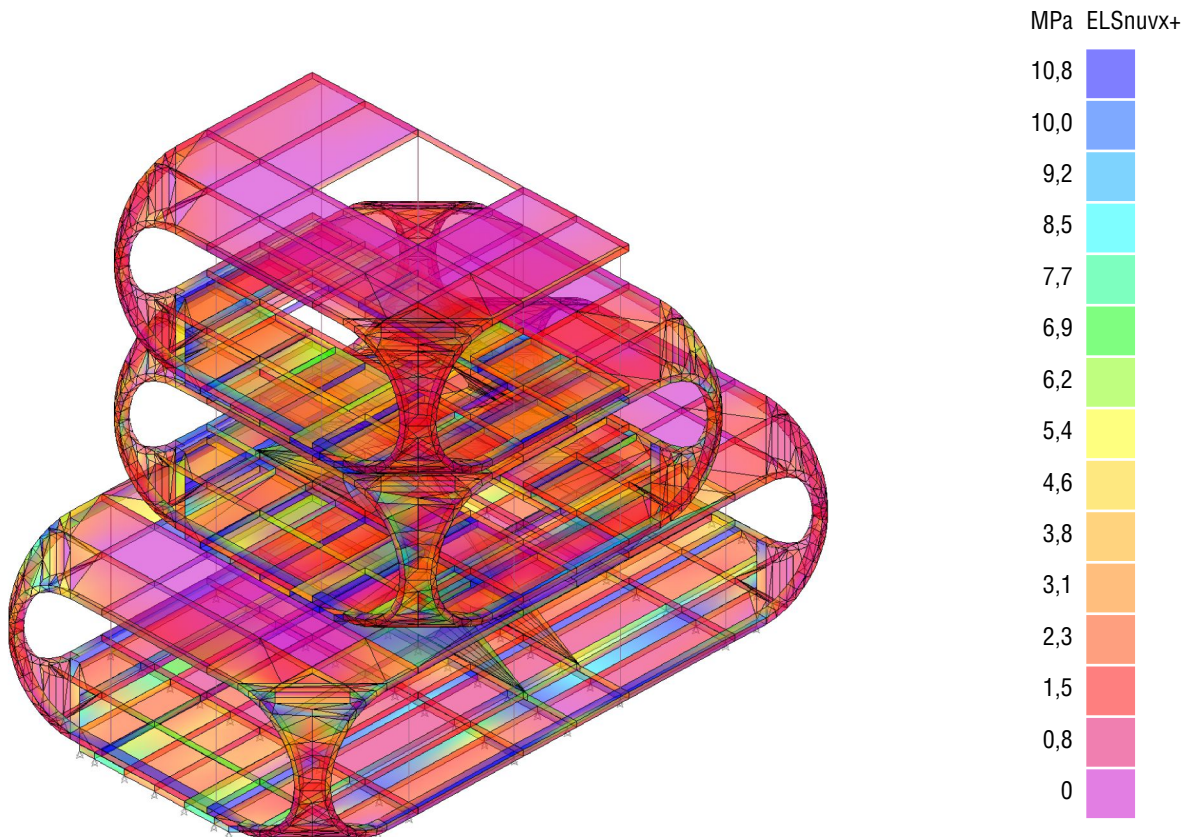
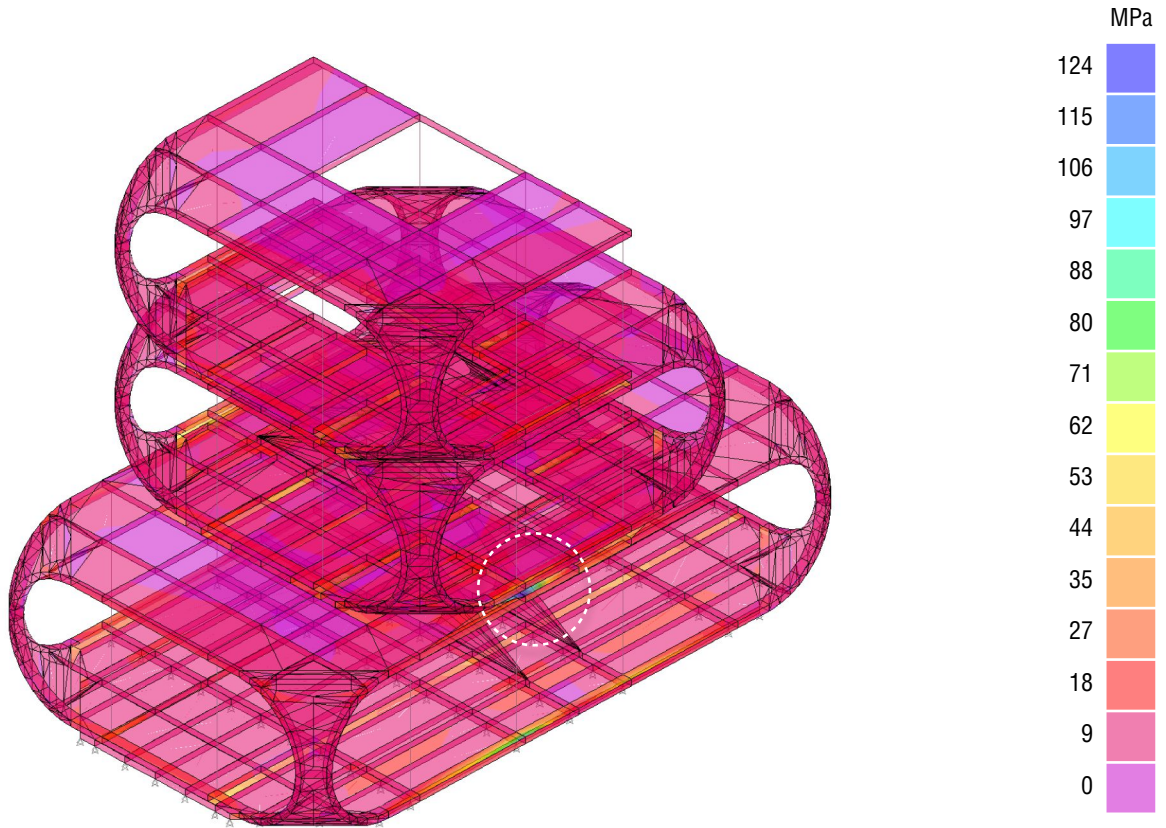
Hipótesis	Peso Propio	Uso	Viento	Nieve	Sismo
ELSp	1	-	-	-	-
ELSvx+	1	-	1 (X)	-	-
ELSvx-	1	-	-1 (X)	-	-
ELSVy+	1	-	1 (Y)	-	-
ELSVy-	1	-	-1 (Y)	-	-
ELSn	1	-	-	1	-
ELSu	1	1	-	-	-
ELUp	1,35	-	-	-	-
ELUu	1,35	1,5	-	-	-
ELUn	1,35	-	-	1,5	-
ELUvx+	1,35	-	1,5 (X)	-	-
ELUvx-	1,35	-	-1,5 (X)	-	-
ELUunvx+	1,35	1,5	0,9 (X)	0,75	-
ELUunvx-	1,35	1,5	-0,9 (X)	0,75	-
ELUnuvx+	1,35	1,05	0,9 (X)	1,5	-
ELUnuvx-	1,35	1,05	-0,9 (X)	1,5	-
ELUvx+un	1,35	1,05	1,5 (X)	0,75	-
ELUvx-un	1,35	1,05	-1,5 (X)	0,75	-
ELUvy+	1,35	-	1,5 (Y)	-	-
ELUvy-	1,35	-	-1,5Y	-	-
ELUunvy+	1,35	1,5	0,9 (Y)	0,75	-

Hipótesis	Peso Propio	Uso	Viento	Nieve	Sismo
ELUunvy-	1,35	1,5	-0,9 (Y)	0,75	-
ELUunvy+	1,35	1,05	0,9 (Y)	1,5	-
ELUunvy-	1,35	1,05	-0,9 (Y)	1,5	-
ELUvy+un	1,35	1,05	1,5 (Y)	0,75	-
ELUvy-un	1,35	1,05	-1,5 (Y)	0,75	-
ELUsisx+	1	0,6	-	-	1 (X) / 0,3 (Y)
ELUsisx-	1	0,6	-	-	-1 (X) / -0,3 (Y)
ELUsisy+	1	0,6	-	-	1 (Y) / 0,3 (X)
ELUsisy-	1	0,6	-	-	-1 (Y) / -0,3 (X)

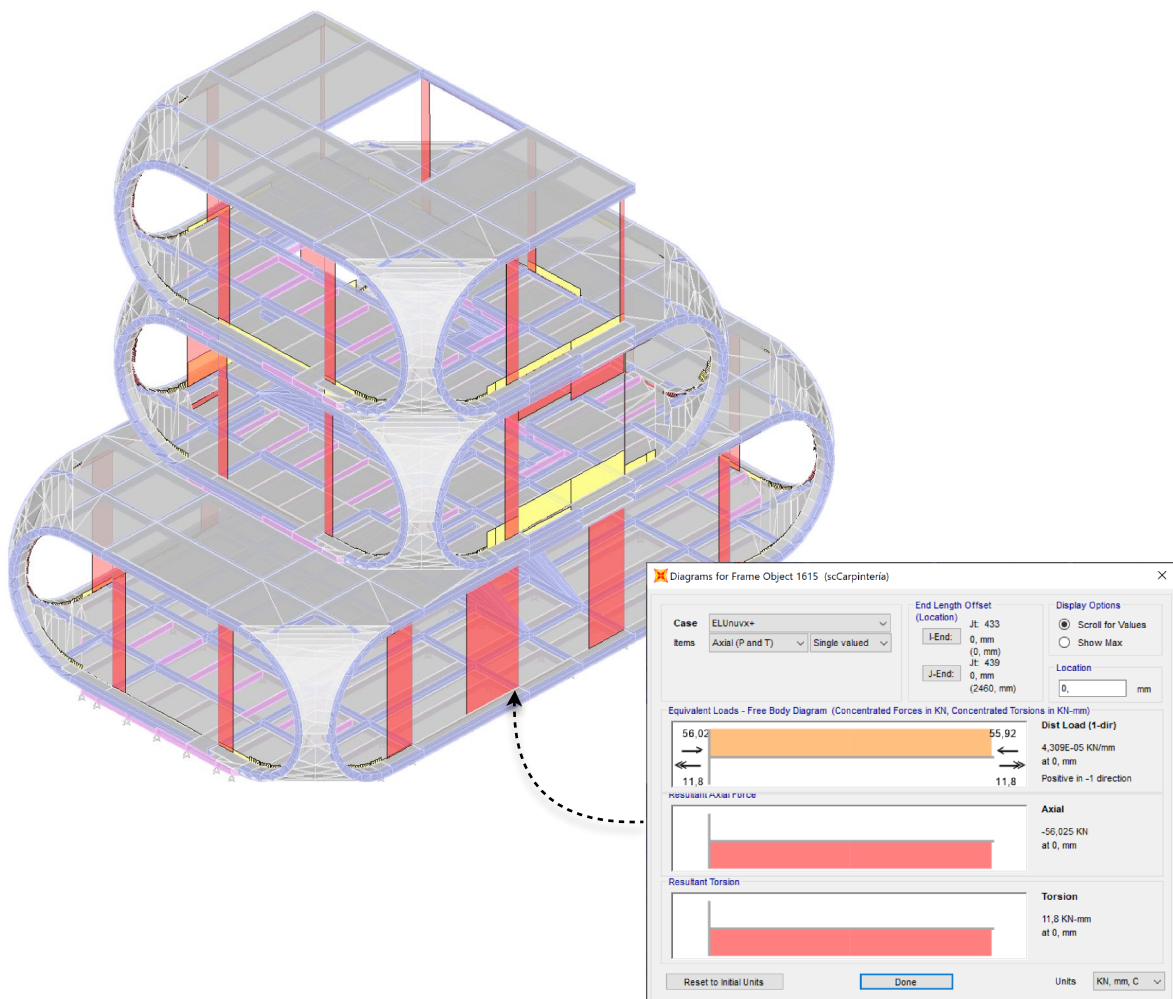
ESTADO LÍMITES ÚLTIMOS

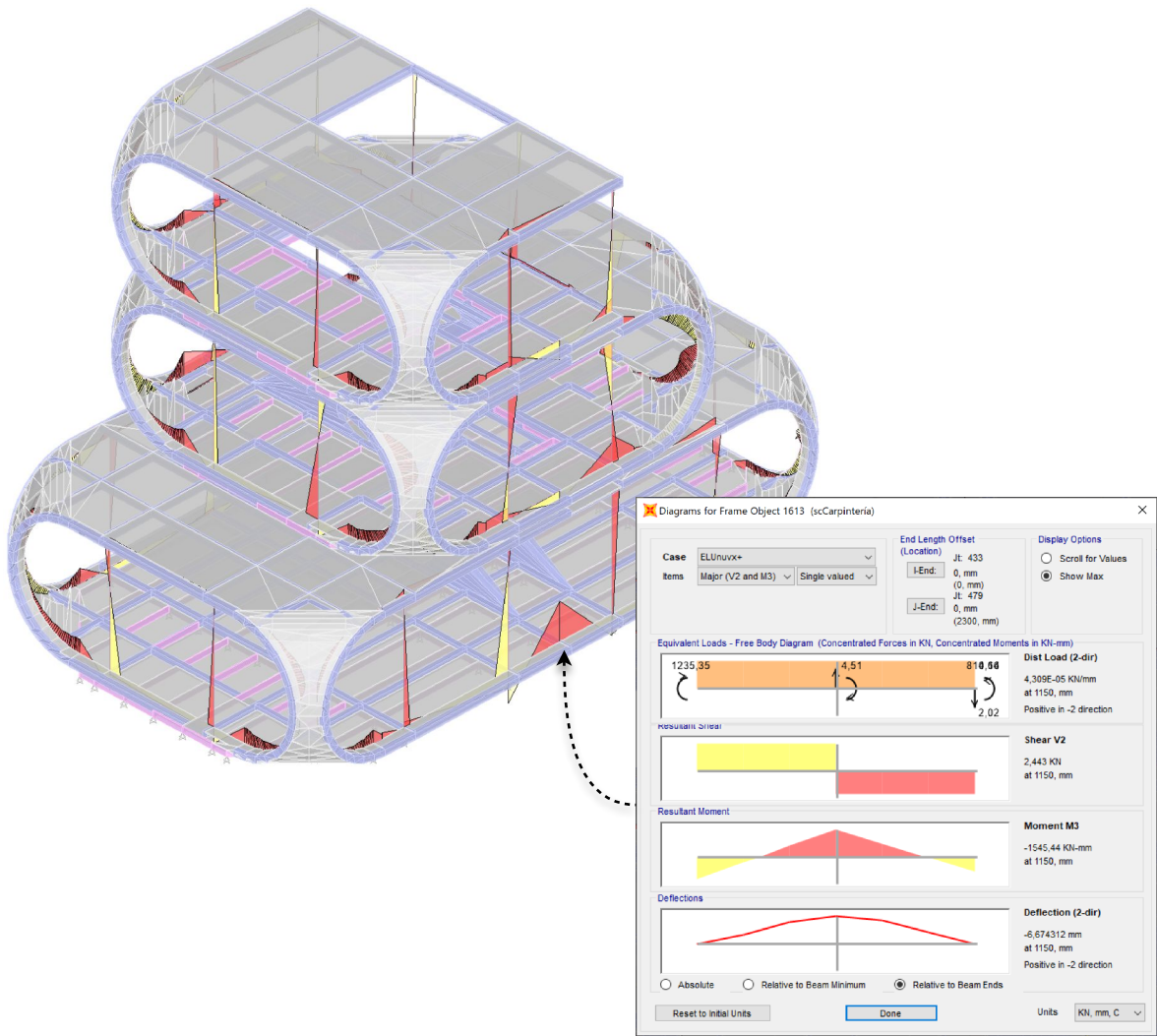
La mayor tensión registrada en la estructura es la correspondiente a la que tiene como variable principal el uso, la nieve como carga de segundo orden y por último el viento en la dirección X en sentido positivo. Estaríamos hablando de que la fibra con mayor tensión por tracción rondaría los 115 MPa ubicada en la zona intermedia del nervio curvo en la fachada de la planta baja. El poliéster tiene una resistencia a tracción de 340 MPa, por lo que el valor está dentro de los márgenes de seguridad. Si entendemos que la rigidez de los extremos curvos es suficientemente eficiente, el mayor problema que se puede encontrar la estructura son las zonas planas, y más aun si se encuentran a mitad de un vano de luz considerable.

Esto arroja luz sobre dos conceptos, el primero que las zonas curvadas funcionan para mejorar el comportamiento de la estructura para transmitir los esfuerzos como si fueran pilares; y lo segundo, que la estructura trabaja correctamente pues al no tener pilares intermedios las tensiones se concentrarán en el plano de fachada que es la principal vía para llegar hasta el terreno. Además, en el mapa de color vemos un color muy homogéneo, el poliéster es capaz de distribuir equitativamente los esfuerzos. Cambiaremos la escala de los colores para demostrar que efectivamente los nervios intermedios también están entrando en carga antes que la membrana de poliéster.



En lo que concierne a las barras o *frames*, siguen un comportamiento similar a los nervios de fachada, concentrándose en la misma zona que las tensiones de tracción del poliéster. La barra más cargada es una de las intermedias de 1 planta baja, concretamente la que no tiene al nervio de la escalera en el mismo plano, por lo que es una zona muy expuesta a que la carpintería entre en carga para transmitir las cargas verticalmente. En total soporta una fuerza de compresión de 56 kN equivalente a 90 MPa en la sección, un valor totalmente admisible para el elemento sin llegar a su límite elástico. Vemos también concentraciones de tracciones en las plantas superiores que evitan que se aplaste la simétrica en la parte superior. Esto en planta no ocurre con la misma magnitud al haber más longitud de perímetro y tener los nudos curvos alejados. Pero podemos ver que todos esos esfuerzos que no se producen en forma de tracción se manifiestan en forma de momentos flectores.



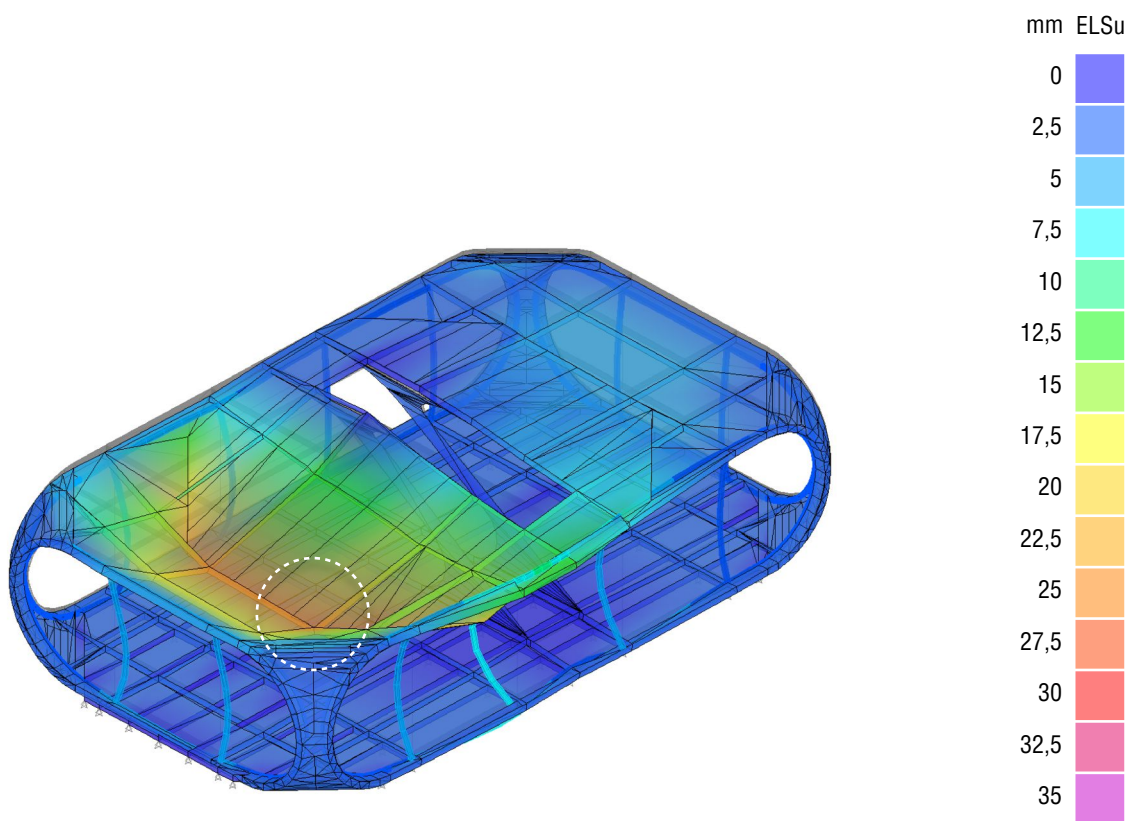
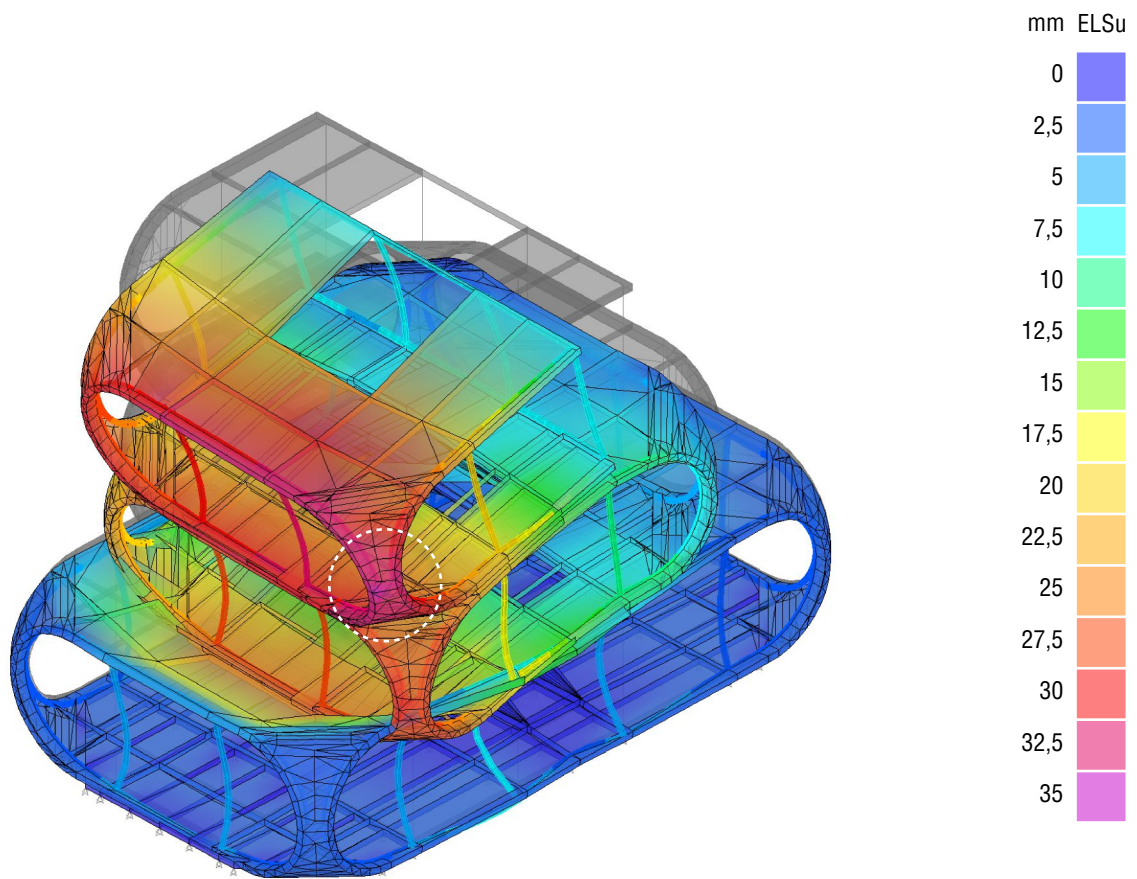


ESTADOS LÍMITE DE SERVICIO

Todo el edificio presenta deformaciones por la ductilidad del plástico, pero se hacen más perceptibles las flechas verticales con la sobrecarga de uso. El nodo cuyo punto en deformación tiene una mayor distancia con respecto a su estado original es el punto medio de la curva en la planta superior. Claramente esto está condicionado por la colocación de la escalera y tiene un desplazamiento de 35 mm. Sin embargo esto no es real, esta deformación viene dada por la acumulación de las flechas en los pisos inferiores. La flecha real que vamos a considerar es la relativa a la planta baja de 25 mm; que no cumple con las exigencias del CTE pues:

$$f \leq h \cdot 1/500 = 2'8 \cdot 10^3 \cdot 1/500 = 5'6 \text{ mm}$$

$$25 \text{ mm} \not\leq 5'6 \text{ mm}$$



Los desplomes horizontales también resultan un problema para la estabilidad de la estructura. Se calculan desplazamiento de hasta 35 mm en valor absoluto originados en su mayoría por las acciones del viento. El sentido de las fuerzas también es importante, pues de nuevo la disposición de la escalera favorece el vuelco de los pisos superiores en la parte más cargada del edificio. En el eje X, en sentido negativo, el desplome relativo llega a 18 mm correspondiente al plano de cubierta de la última planta; mientras que en Y, también en sentido negativo, el nudo curvo de la cubierta se desploma 20 mm. Ninguna de las flechas está por debajo del máximo permitido en la Normativa.

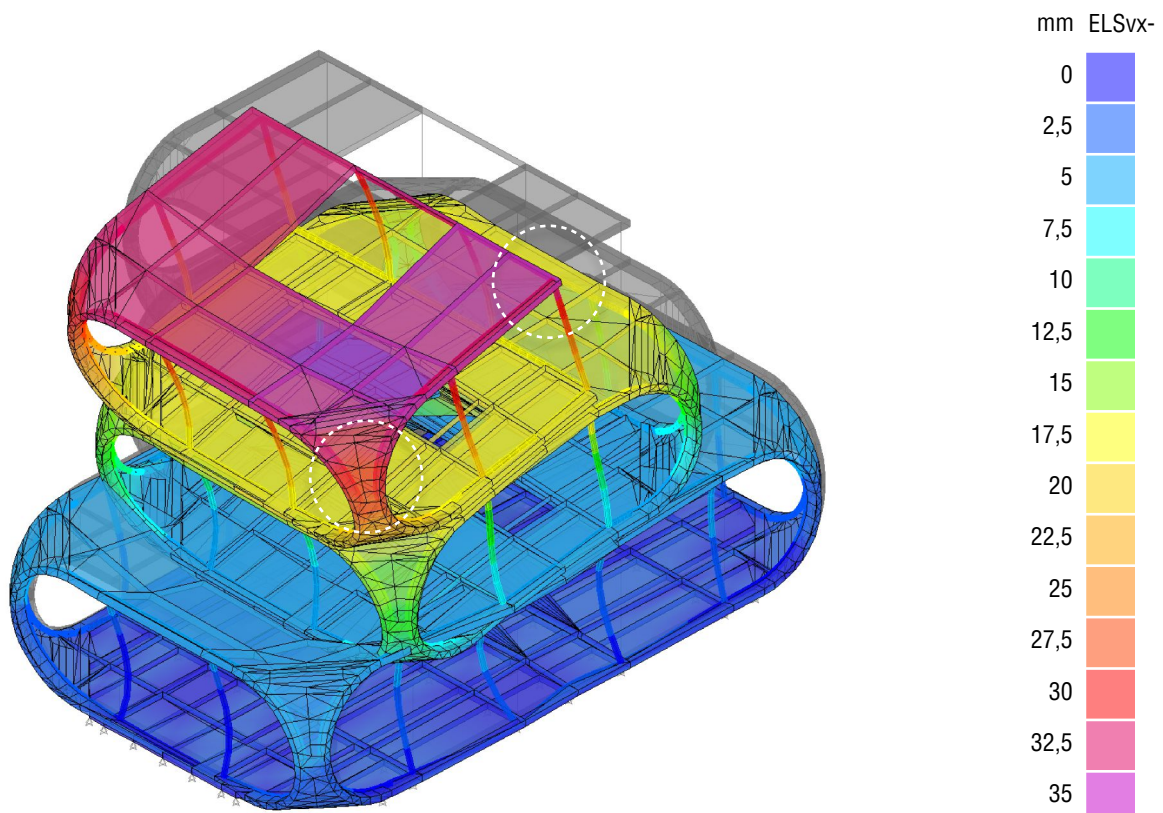
$$f_T \leq H \cdot 1/500 = 8'4 \cdot 10^3 \cdot 1/500 = 17 \text{ mm}$$

$$35 \text{ mm} \not\leq 17 \text{ mm}$$

$$f \leq h \cdot 1/250 = 2'8 \cdot 10^3 \cdot 1/250 = 11 \text{ mm}$$

$$18 \text{ mm} \not\leq 11 \text{ mm}$$

$$20 \text{ mm} \not\leq 11 \text{ mm}$$



CONCLUSIONES

En consecuencia de los cálculos del modelo proyectado, se confirma el comportamiento dúctil del plástico como un elemento estructural. El material apenas presenciaba la mitad de las tensiones necesarias para su colapso, pero únicamente con las cargas del peso propio y peso material permanente ya había alcanzado las deformaciones finales de las hipótesis de carga comentadas. El mayor problema de las construcciones con poliéster vendrían dados por las consecuencias de tener un módulo de deformación alto. El aumento de sección podría mejorar el trabajo de la estructura pero continuarían habiendo flechas y desplomes que comprometerían el servicio de la estructura.

Cabe destacar el buen comportamiento de los nudos curvos de las esquinas. Se mantienen intactos pese al resto de componentes plásticos; incluso en planta baja su aplastamiento es mínimo si lo comparamos con el nervio horizontal más afectado. Queda claro que la curvatura es la gran aliada de los plásticos para que se conviertan en un material portante, no solo sirve para estabilizar las estructuras textiles (sean de plástico o no). La geometría influye mucho en el comportamiento general de las estructuras y en particular aquellas que no parten de un material suficientemente rígido.

Las obras analizadas bebían mucho del concepto de la curva, pero no se ha llegado a potenciar lo suficiente como para alzar edificios de mayor magnitud. La “planta única” ha sido la característica principal de las construcciones que se han hecho hasta ahora con plástico, y el cálculo de la propuesta demuestra por qué. Los plásticos aplicados a la disciplina de la arquitectura siguen sin haber avanzado lo suficiente como para tener una base con la que diseñar estructuras.

Cierto es que los polímeros son empleados en infinidad de soluciones para salubridad o confort, pero pese a que ya se venían diseñando estructuras de plástico desde los años 60s, el tema a quedado relegado a un segundo plano y no ha tenido apenas investigación. Ahora mismo con la concienciación que hay en contra de los plásticos, será aun más difícil invertir y dedicar tiempo a las propiedades de este material. Sin embargo debemos recordar que esta opción existe y que con las pautas adecuadas es totalmente válida.

BIBLIOGRAFÍA

LIBROS

- SAECHTLING, Hansjergen. *Los plásticos en la Construcción*. Barcelona: Editorial Gustavo Gili , 1978. ISBN 84-25207-39-8
- ENGELSMANN, Stephan, SPALDING, Valerie y PETERS, Stefan. *Plastics: In Architecture and Construction*. Basilea: Walter de Gruyter, 2010. ISBN 30-34603-22-3
- JESKA, Simone. *Transparent Plastics: Design and Technology*. Alemania: Springer Science & Business Media, 2007. ISBN 37-64374-70-5
- REYNOSO, Sara. *Los Polímeros Plásticos: Los Conceptos Básicos que debes conocer durante y al salir de la Universidad*. Madrid, 2018. ISBN: 17-90826-00-4
- KUTZ, Myer. *Applied Plastics Engineering Handbook: Processing and Materials*. Norwich: William Andrew, 2011. ISBN 18-48728-18-2
- GORDON, James Edward. *Estructuras o porque las cosas no se caen*. Madrid: Calamar Ediciones, 2004. ISBN 84-96235-06-8
- COBBERS, Arnt y JHAN, Oliver. *Prefav Houses*. Los Angeles: TASCHEN, 2010. ISBN 978-3-8365-2184-0
- VYZOVITI, Sophia. *Folding architecture: spatial, structural and organizational diagrams*. Amsterdam: BIS Publishers, 2003. ISBN 90-63690-59-2
- CHEREMISINOFF, Nicholas y CHEREMISINOFF, Paul. *Fiberglass Reinforced Plastics*. William Andrew: Norwich, 2013. ISBN 14-55778-68-0
- DIETZ, Albert. *Plásticos para Arquitectos y Constructores*. Editorial Reverté: Barcelona, 2003. ISBN 978-84-291-2027-1

REVISTAS

- MATEO GARCÍA, Mónica y PÉREZ-CARRAMIÑANA, Carlos. *RA: Revista de Arquitectura. Una Casa del Futuro Finlandesa a orillas del Mediterráneo*. [en línea], Servicio Publicaciones Universidad de Navarra Universidad de Navarra: Pamplona, 2012, num. 14, pp. 61-70 [consulta: 18 de junio de 2020]. ISSN 1138-5596. Disponible en: <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/27575>
- SCHEIN, Lionel y MAGNANT, Yves. *Casa de plástico, en Francia*. [en línea], Informes de la Construcción: España, 1958, vol. 10, num. 98 [consulta: 21 de junio de 2020]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/ejemplar/253077>
- VOIGT LEIPZIG, Pamela. *Das fg2000 in Erkerode*. [en línea], Bauwelt: Gütersloh, 2008, num. 46, pp. 9. [consulta: 21 de junio de 2020]. Disponible en: https://www.bauwelt.de/dl/794489/10826466_f98697b099.pdf
- ZEINSTRA, Jurjen. *Houses of the Future*. [en línea], OASE: Países Bajos, 2008, num. 75 [consulta: 21 de junio de 2020]. Disponible en: <https://oasejournal.nl/en/Issues/75/HousesOfTheFuture>
- ŠEKULARAC, Nenad, IVANOVIĆ ŠEKULARAC, Jelena y ČIKIĆ TOVAROVIĆ, Jasna. *Folded Structures in Modern Architecture*. [en línea], University of Belgrade: Servia, 2012, vol. 10, pp. 1-16 [consulta: 26 de junio de 2020]. DOI: 10.2298/FUACE1201001S. Disponible en: <https://doi.org/10.2298/FUACE1201001S>
- MARZO RUIZ, Álvaro. *Estadio Wanda Metropolitano. Caso de estudio cubierta del estadio*. [en línea], Revista Digital Del Cedex: Madrid, 2018, num. 189 [consulta: 27 de junio de 2020]. Disponible en: <http://ingenieriacivil.cedex.es/index.php/ingenieria-civil/article/view/1294>
- WALKER, Anthony. *Plastics: The Building Blocks of the Twentieth Century*. [en línea], The Construction History Society: Berkshire, 1994, vol. 10, pp. 67-88. [consulta: 1 de julio de 2020]. Disponible en: <https://www.jstor.org/stable/41613731>

ARTÍCULOS

- RODRÍGUEZ CEDILLO, Carmelo. *Arqueología del Futuro* [en línea]. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid: Madrid, 2016 [consulta: 18 de junio de 2020]. Disponible en: <http://oa.upm.es/40365/>
- DÍAZ VIZOSO, Laura. *Fabricación Digital en Fachadas: Difuminación de los Límites Constructivos mediante la Impresión 3D* [en línea]. Trabajo Fin de Grado. Universidad Politécnica de Madrid: Madrid, 2018 [consulta: 18 de junio de 2020]. Disponible en: <http://oa.upm.es/49446/>
- RATSCHKE, Nils, BÖGLEA, Annette y LINDENBERG, Jon. *Parametric Analysis of Tensegrity-Membrane-Structures* [en línea]. Simposio. International Association for Shell and Spatial Structures: Hamburgo, 2017 [consulta: 26 de junio de 2020]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/320373049>
- OVERVELDE, Johannes T. et al. *Rational design of reconfigurable prismatic architected material* [en línea]. Trabajo de investigación Universidad de Harvard: Cambridge, 2017 [consulta: 1 de julio de 2020]. Disponible en: https://bertoldi.seas.harvard.edu/files/bertoldi/files/bas_nature.pdf

PÁGINAS WEB

- Plataforma Arquitectura [en línea]. AD Editorial, 2008 [consulta: 26 de mayo de 2020]. Disponible en: www.plataformaarquitectura.cl
- Construmática [en línea]. Grupo INTERCOM, 1995 [consulta: 26 de mayo de 2020]. Disponible en: www.construmatica.com
- PlasticsEurope [en línea]. Association of Plastics Manufacturers. Grupo PlasticsEurope, 2020 [consulta: 27 de mayo de 2020]. www.plasticseurope.org

- As-tu dé-jà OUBLIE [en línea]. CRAZEEKID, Tony, 2011. [consulta: 26 de mayo de 2020]. Disponible en: astudejaoublie.blogspot.com
- BubbleMania [en línea]. MANEVAL, Virginie, 2018. [consulta: 27 de mayo de 2020]. Disponible en: www.bubblemania.fr
- Estudio de Arquitectura [en línea]. BELLOSTES, Judit, 2013. [consulta: 27 de mayo de 2020]. Disponible en: blog.bellostes.com
- Inexhibit [en línea]. BIANCHINI, Riccardo y LUSIARDI, Federica, 2009. [consulta: 27 de mayo de 2020]. Disponible en: www.inexhibit.com

NORMATIVAS

- Código Técnico de la Edificación (CTE)
- Norma de Construcción Sismorresistente (NCSE)

ANEXOS

Catálogo de obras

- Arboskin (pág.16)
- Air's Monumental Luminaria (pág.65)
- Ban' Pavilion (pág.01)
- Basketball Arena de Londres (pág.48)
- Bubble House 6 Shells (pág.39)
- Building Bytes (pág.64)
- Business Incubator en Archena (pág.11)
- Caravane Fleur (pág.54)
- Casa en Tlayacapan (pág.39)
- Coral-Like Pavilion (pág.62)
- Eden Project Ice Rink Structure (pág.48)
- Ellipsicoon (pág.10)
- Estadio Olímpico de Múnich (pág.42)
- Estadio Wanda Metropolitano (pág.47)
- Expo 2000 Hannover (12)
- FEDA de Albacete (11)
- Republic of Germany Pavilion (pág.48)
- Filament Tower (pág.12)
- Future House (pág.01)
- Great White (pág.51)
- House Of The Future (pág.35)
- JS Bach Music Hall (pág.41)
- Khan Shatyr Center (pág.48)
- Kunststoffhaus FG2000 (pág.33)
- Lighting Smart Facade (pág.57)
- Lilas Pavilion (pág.65)
- Maneuvrable Structure (pág.56)
- Maison Tout en Plastiques (pág.38)
- Minimal Complexity (pág.63)
- MOON (pág.53)
- Naenae Bowling Club (pág.44)
- Oficinas Bakelite Ltd. (pág.36)
- Olympic Shooting Venue (pág.10)
- On Space Time Foam Exhibition (pág.57)
- Reconfigurable Structure (pág.56)
- Rubber House (pág.14)
- Science Museum (pág.65)
- Serpentine Sackler Gallery (pág.11)
- Shapeshift (pág.57)
- Sheffield Winter Garden (pág.12)
- Shellstar Pavilion (pág.39)
- Soundhouse (pág.13)
- Superficies Mínimas (pág.59)
- SURI Shelter (pág.50)
- The Cloud Party Central (pág.45)
- The Couch MVRDV (pág.14)
- The Green Magic Homes (pág.39)
- The Solar Bytes Pavilion (pág.16)
- Trabeculae Pavilion (pág.65)
- Venturo C.F. (pág.32)
- Volvo Pure Tension Pavilion (pág.13)

ANEXOS

Tabla de propiedades de los plásticos

Tabla 8. Propiedad

Propiedad	ABS	PMMA	CA	EP	PTFE	MF	PA	P
Resistencia a tracción (kg/cm²)	273-547	478-752	136-615	273-2.052	136-478	342-889	479-2.394	205-
Alargamiento hasta rotura (%)	2-300	2-10	5-100	0,5-70	80-300	0,3-0,9	10-320	0,13-
Módulo de elasticidad (10⁴ kg/cm²)	1,57-7,04	2,39-3,42	0,44-4,10	0,007-20,79	0,34-2,05	8,21-16,42	0,75-12,31	1,71-
Resistencia a compresión (kg/cm²)	478-1.505	752-1.231	136-2.426	68-2.736	116-684	1.368-3.078	458-1.641	684-4
Módulo de compresibilidad (10⁴ kg/cm²)	1,16-2,66	2,53-3,14	-	-	0,82	-	1,26-1,69	-
Resistencia a flexión en límite elástico (kg/cm²)	342-1.847	820-1.162	136-1.094	68-4.104	506-636	615-1.573	No rompe hasta 1.197	273-
Módulo de flexión (10⁴ kg/cm²)	1,37-6,89	2,67-3,21	-	-	1,37	-	0,96-7,79	16,
Dureza Rockwell	R75-M100	M80-M105	R34-R125	M80-M120	R25(shore)-D80	M110-M125	R108-E75	M37-
Resistencia al impacto (kg. cm/cm)	5,4-54,3	1,6-2,7	2,1-46,2	1,0-54,3	16,3-no romper	1,3-32,6	5,4-29,9	1,0-
Conductividad térmica (kcal. cm/m² h. °C)	2,50-4,43	2,31-3,28	2,12-4,43	2,31-16,79	1,73-3,28	3,66-9,45	2,89-4,82	1,73-
Coefficiente de dilatación lineal (10⁻⁶/°C)	70-131	50-90	79-199	5,4-99	45-118	15-45	12-149	25-
Resistencia al calor continuo (°C)	60-110	60-93,3	46-104	93,3-207,8	148,9-287,8	98,9-204,4	79-204,4	93,3-
Absorción de humedad 24 horas, 3 mm grueso (%)	0,2-0,45	0,3-0,4	0,8-7	0,08-4	0,00-0,04	0,08-0,80	0,4-1,5	0,1-
Velocidad de combustión (cm/min)	lenta atiestinguible	lenta	autoextinguible a muy rapida	lenta a incombustible	no combustible a autoextinguible	no combustible a muy lenta	autoextinguible a lenta	ceros a
Efecto de la luz solar	ninguno a amarilleamiento	ninguno	ligero a decoloración	ninguno a ligero	ninguno a ligera decoloración	ligero a ennegrecimiento	ligera decoloración	oscu
Transparencia	translúcido a opaco	excelente a opaco	transparente a opaco	transparente a opaco	transparente a opaco	translúcido a opaco	translúcido a opaco	transpa opa
Mecanibilidad	buena a excelente	regular a excelente	buena a excelente	mala a excelente	excelente	regular a buena	regular a excelente	mala a
Compuesto	Acrlonitrilobuta dienolestireno	Acrílicos	Celulósicos	Epoxis	Plásticos fluorados	Melamina formol	Nylon poliamida	Fenol-

Tipos de los Plásticos

UF	PC	UP	PE	PP	PS	SL	UF	UP	PVC
1.231	547-1.368	55-3.420	68-376	198-616	103-1.368	55-2.394	376-889	12-664	34-616
2,25	0,90-1,30	0,50-310	15-1.000	2-700	0,75-80	100	0,50-1,00	10-1.000	2-450
34,20	2,39-12,7	2,05-13,7	0,09-1,23	0,68-6,15	1,02-9,57	0,006-20,52	6,84-10,26	0,06-6,84	0,34-4,10
4.788	855-1.300	821-3.420	376	253-547	275-1.505	7-1231	1.710-3.078	1.368	68-1.505
-	2,05-3,08	-	1,02	2,05	3,62	-	-	0,027-0,68	4,10
410	923-2.052	547-5.472	479	342-752	342-1.778	2.394	684-1.231	616	1,163
41	2,32-8,20	13,68	2,39	0,88-5,64	12,31	-	8,89-10,94	0,068-2,39	2,73
E101	M70-R118	60(barcol)-E98	D30(shore)-R15	R30-R110	R50-E60	40(shore)-M95	M110-M120	20A(shore)-M28	10A(shore)-M85
97,8	6,52-95,13	1,08-86,97	2,71-108,72	2,71-108,72	1,35-59,79	81,54	1,35-2,17	27,18-flexible	2,17-108,72
12,35	1,89-4,05	3,24-19,44	1,62-3,24	1,62-3,24	0,57-1,93	1,93-7,33	3,86-5,59	0,96-4,05	1,73-38,60
59	18-66	12-100	28-102	28-102	34-210	7-300	21-36	100-201	50-351
287,8	121,1-135	121,1-232,2	87,8-160,0	87,8-160,0	60,0-104,4	204,4-315,6	76,7	87,8-121,1	48,9-98,9
0,2	0,07-0,20	0,01-1,0	0,01-0,06	0,01-0,05	0,03-0,6	0,2	0,4-0,8	0,02-1,5	0,02-3,0
lenta	autoextinguible	lenta a incombustible	lenta a incombustible	lenta a incombustible	lenta a incombustible	cero a lenta	autoextinguible	lenta a autoextinguible	lenta a autoextinguible
parece	ligero cambio de color	nada a ligero amarilleamiento	se cuarteo rápidamente sin protección	se cuarteo rápidamente sin protección	ligero amarilleamiento	ninguno a ligero	agrisamiento de colores suaves	ninguno a amarilleamiento	ligero
transparente a opaco	transparente a opaco	transparente a opaco	transparente a opaco	transparente a opaco	transparente a opaco	transparente a opaco	transparente a opaco	diáfano a opaco	transparente a opaco
buena	regular a excelente	mala a excelente	regular a excelente	regular a buena	regular a buena	regular a buena	regular	regular a excelente	mala a excelente
formol	Polycarbonato	Poliéster	Poliétileno	Polipropileno	Poliestireno	Siliconas	Urea-formol	Uretanos	Policloruro de vinilo

“El arquitecto del futuro se basará en la imitación de la naturaleza, porque es la forma más racional, duradera y económica de todos los métodos.”

Antonio Gaudí

