

Prototipado de uniones plegables para envolventes conformadas por CLT y barreras de humedad

Estudiante: Martina Mansilla Yáñez

Profesor guía: Felipe López

Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Chile

Resumen

En la presente investigación se analiza la combinación de tableros de madera contralaminada y una barrera de humedad, los que configuran una envolvente plegable continua. Se concibe al elemento plegable como un recurso de eficiencia a la hora de transportar y construir estructuras de forma rápida, como viviendas de emergencia. Es así que, dada la alta capacidad estructural del CLT es que se observa como oportunidad para crear una estructura de este tipo, generándose la necesidad de encontrar un elemento flexible que permitiera el plegado. Se realizó un análisis de las membranas existentes, para luego construir prototipos plegables a partir de la unión membrana-madera, se puso a prueba, tanto el comportamiento mecánico de las membranas como la conformación de ángulos de las estructuras, de esta forma se determinaron las características mínimas que deben tener las materialidades para conformar este tipo de estructuras.

Palabras clave: Arquitectura de emergencia plegable, *Folding houses*, Plegado arquitectónico, Membrana hidrofuga, Madera contralaminada.

1. Introducción

Chile se ha visto afectado por catástrofes de todo tipo a lo largo de su territorio, en los últimos 10 años han ocurrido al menos 80 siniestros (Sernageomin, 2017), siendo un porcentaje importante el impacto en los habitantes. Una manera de responder ante el déficit habitacional tras una catástrofe, es a través de viviendas de emergencia, que constituyen soluciones rápidas de suma relevancia. En Chile, por ejemplo, en el año 2015 Fundación Vivienda construyó 1054 viviendas de este tipo.

Bajo este contexto, una manera más eficiente para responder ante la necesidad de soluciones rápidas son las estructuras plegadas. Sus principales ventajas son el poco volumen que ocupan al estar almacenadas en bodegas y su eficiencia en el traslado, ya que se movilizan múltiples ejemplares en pocos viajes a las zonas afectadas. Al ser plegadas constituyen un elemento continuo que hace más entendible la estructura y facilita su armado, principalmente, por la reducción de piezas que la conforman.

Chile es uno de los 10 más importantes productores internacionales de madera (P.Guindos, 2019), catalogándose como un país maderero, donde se genera la oportunidad de innovar con la madera en sus distintas formas. Se plantea la construcción de estructuras plegables en base a placas de madera contralaminada, un material macizo de gran calidad, que genera una envolvente de alto estándar de manera inmediata. Su alta resistencia en relación a su poco peso junto a su gran desempeño estructural, su capacidad de constituir muros rígidos, la posibilidad de adquirir geometrías de todo tipo y su buen desempeño en ámbitos sísmicos, resistencia al fuego y humedad, lo transforman en un material idóneo para experimentar en este planteamiento.

El plegado de una estructura se desprende de la conceptualización del armado de una caja de pizza de cartón, elemento plano que a través del pliegue genera un volumen en el espacio. Ahora, al llevar esto a la arquitectura y tratarse de un elemento rígido, el CLT no puede plegarse, solo cortarse, lo que deriva a la necesidad de otro material que sea flexible, y le otorgue la característica plegable a la estructura con la eficiencia del armado de una caja de pizza.

Este material, además de ser flexible debe constituir una barrera de humedad como protección a la estructura. Los paneles de CLT son susceptibles a la humedad, ya que al ser un elemento orgánico los hongos como el moho, pueden afectar su desempeño estructural. De esta manera, barreras de humedad se posicionan como una oportunidad de ser utilizadas para la investigación, por ejemplo, membranas hidrórepelentes o de polietileno, revestimiento de fibras, entre otros.

Plantear este tipo de estructuras plegables genera varias incógnitas, primeramente, no se conocen las características geométricas que debiesen tener las placas de CLT, es decir, el tipo de ángulo de corte a realizar. Por otro lado, no hay conocimiento de las características técnicas y específicas que este debe tener el material flexible. De esta forma se establece como objetivo de la investigación determinar las características mínimas que deben tener, tanto los paneles de CLT como la barrera de humedad para conformar una envolvente plegable, además de identificar las posibilidades de plegado, según el tipo de unión entre ambos materiales.

2. Antecedentes

2.1. Plegados

Una estructura plegable es definida como un elemento continuo que puede ser sometido al pliegue de sus partes para concebir un modelo espacial, considerando, además la definición de pliegue como el doblez con cierto ángulo que genera la división de sus partes.

Jackson (2011), realizó un estudio sobre el plegado de elementos y como esto es aplicable en la arquitectura. El primer tipo de plegado es el “acordeón” (Fig. 1), un plegado básico valle-monte-valle (valle siendo el punto más bajo del pliegue y monte el más alto), el cual determina un patrón regular por la separación entre dobleces. Este tipo de plegado posibilita la experimentación con la forma, ya que permite la variación del espaciado y cortes en la placa que diversifiquen la geometría.



Figura 1: Nota. Extraído de *Folding techniques for designers from sheet to form* (p.55) por P. Jackson, 2011, Laurence King Publishing Ltd.

El plegado “plisado” (Fig. 2), también es en base a valle-monte-valle, se diferencia, principalmente, en la distancia entre la primera relación valle-monte, al cambiarse la medida del espaciado se genera un desplazamiento de la estructura hacia un costado, ya que a diferencia del anterior no es un zigzag continuo con medidas iguales.

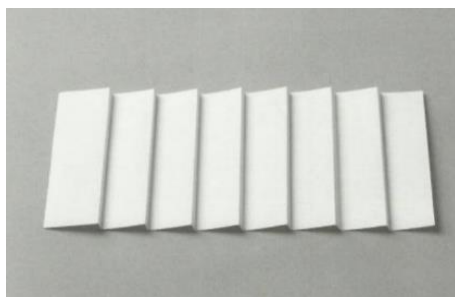


Figura 2: Nota. Extraído de *Folding techniques for designers from sheet to form* (p.64) por P. Jackson, 2011, Laurence King Publishing Ltd.

El tercer tipo de plegado básico es el “tipo caja” (Fig.3), este consta de cuatro dobleces repetidos, los cuales al ser plegados forman volúmenes con distintos tipos de ángulos. La configuración de este elemento al estar compuesto por caras y no bordes le otorga más estabilidad al conjunto, debido a que los montes se encuentran todos al mismo nivel.

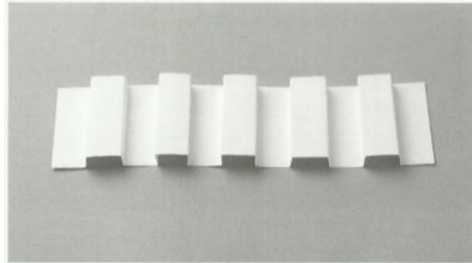


Figura 3: Nota. Extraído de *Folding techniques for designers from sheet to form* (p.72) por P. Jackson, 2011, Laurence King Publishing Ltd.

Por último, se mencionan los “plegados incrementales” (Fig. 4) en donde el espaciado entre los pliegues va disminuyendo o aumentando progresivamente, generando geometrías dinámicas que pueden parecer confusas para el espectador, es una técnica más estética que funcional.

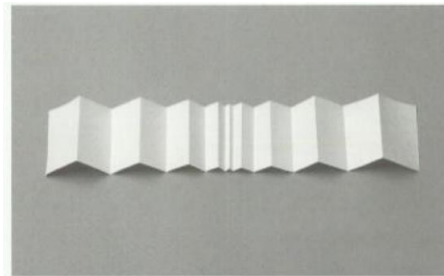


Figura 4: Extraído de *Folding techniques for designers from sheet to form* (p.78) por P. Jackson, 2011, Laurence King Publishing Ltd.

De lo expuesto por el autor se pudo extraer, principalmente, la esencia del plegado, es decir, como es el pliegue que se le hace a un elemento y como este puede variar. En el primer caso el doblez se hizo en partes iguales, obteniendo una figura con dos lados equivalentes, con ángulos de apertura variables entre agudo, obtuso y recto. En el segundo caso, el doblez permitió generar elementos menos simétricos, variando el ángulo según el criterio a utilizar. Y en el tercer caso se observó un elemento compuesto por 4 partes, donde estas podrían variar en medidas, formando un volumen con más caras, dando también la posibilidad de variar con los ángulos entre elementos, por un lado, mantener los 90° para formar una caja o experimentar con los ángulos y crear nuevas volumetrías.

2.2. Plegado como morfología en arquitectura

Ha existido un interés por desarrollar el plegado bajo distintos criterios de diseño y de consideración del pliegue, Stravic et al. (2015) plantearon el diseño y construcción de una estructura estéticamente plegable en base al CLT, diseñada a partir del concepto del origami (Fig. 5). Para llevar a cabo la construcción de esta estructura, se diseñó cada pieza por separado, las cuales fueron cortadas en los paneles con los ángulos específicos, para luego ser ensambladas y generar la estructura, ya que el CLT al ser un material rígido no puede ser plegado al igual que una hoja de papel, por lo tanto, debe ser cortado. En este proyecto el pliegue fue utilizado como concepto de diseño, dado que su armado y estructuración no son a partir del plegado.



Figura 5: Extraído de *Generative Design for folded timber structures* por Stravic et al., 2015.

La renovación de la casa madre de las Diaconisas de la Comunidad de St-Loup (Fig.6) diseñada por Danilo Mondada y Localarchitecture es otro ejemplo de arquitectura diseñada a partir del pliegue. Esta edificación construida con paneles de madera utilizó la técnica del origami en zigzag como referente para su diseño, determinando así una “*folded plate structure*” con una geometría base de un trapecoide que se va replicando a lo largo de la estructura.



Figura 6: Nota. Adaptado de *Capilla temporal para las diaconisas de St-Loup* / Danilo Mondada + LOCALARCHITECTURE por Nico Saieh, 2008, Archdaily (<https://www.archdaily.cl/cl/892185/capilla-temporal-para-las-diaconisas-de-st-loup-danilo-mondada-plus-localarchitecture>)

2.3. Estructuras plegables en la arquitectura

El *módulo abitativo desplegable* o M.A.D.I (fig 8), es un sistema constructivo desarrollado por el arquitecto Renato Vidal, que utilizó el plegado como técnica para la creación de edificaciones antisísmicas con gran eficiencia energética. Son módulos que se caracterizan por su rapidez de construcción, su práctico transporte y su carácter modular permite libertad de construcción, ya que se pueden adicionar más módulos a través del ensamble (Renato Vidal, s.f). Son viviendas prefabricadas que se montan a través de un sistema de paneles plegables, cuya construcción es bastante rápida, ya que demora aproximadamente 6 horas. Su estructura se compone, principalmente, de CLT junto a perfiles y tubos de acero resistentes a la corrosión y bisagras especiales que garantizan el plegado de la vivienda (EcolInventos, 2017).



Figura 8: Nota. Adaptado de *Italian Architect Designs Folding House That Can Be Built in 6 Hours* por Ciclovivo, 2017, Arch Daily (<https://www.archdaily.com/885915/italian-architect-designs-folding-house-that-can-be-built-in-6-hours>)

“*Tricycle house*” es una casa transportable que a través del pliegue tipo acordeón (Fig. 9) permitió generar espacios más amplios o nuevas habitaciones. La materialidad de la estructura es de plástico, las partes que componen el volumen plegado son cortadas para luego ser soldadas, y lo que hace posible el plegado es la flexibilidad del material que compone la estructura, ya que al estar formada por polipropileno puede plegarse sin deformarse (Gessato, 2012).



Figura 9: Nota. Adaptado de *Tricycle House and Tricycle Garden / People's Architecture Office (PAO) + People's Industrial Design Office (PIDO)* por Alison Furuto, 2012, ArchDaily (<https://www.archdaily.com/312651/tricycle-house-and-tricycle-garden-peoples-architecture-office-pao-peoples-industrial-design-office-pido>)

2.4. CLT como elemento estructurante

Para el diseño de una estructura plegable -como elemento continuo que al plegarse sea autosoportante y resista cargas externas- se requiere un material rígido como la madera contralaminada. El CLT (*Contra laminated timber*) es un material innovador que poco a poco se está haciendo más visible en la industria de la construcción, está compuesto por láminas de madera encoladas de forma perpendicular una sobre la otra, generando de esta manera paneles altamente resistentes a los esfuerzos, tanto de compresión como tracción (Solid clt, s.f).

El grosor del panel varía entre 60 mm y 240 mm, las medidas de este pueden alcanzar los 12 m de largo y 3 m de ancho y su densidad es de 470 kg (Solid clt, s.f) (Xilonor, s.f). Esto permite la creación de estructuras en base a muros o elementos macizos, cuyo peso puede alcanzar los 3384 kg. La diversidad de medidas es una de las principales ventajas del CLT, ya que ofrece una gran versatilidad en el diseño. Esta versatilidad permite generar diversas formas y uniones según requiera el proyecto, lo que es posible gracias a la mecanización de este, adquiriendo relevancia para esta investigación, ya que el CLT deberá ser sometido a cortes que dependen, principalmente, del diseño de la estructura.

El CLT se ha posicionado como un material con un gran desempeño, principalmente, por su composición, ya que al colocar las láminas de madera cruzadas permite resistir cargas en distintos sentidos, y tener un buen rendimiento ante las cargas sísmicas (Van de Kuilen, 2011). Su alta resistencia se puede evidenciar en la construcción de edificaciones de varias plantas, demostrando la eficiencia del material y su potencial como elemento estructurante. En Japón se han realizado pruebas de resistencia ante sismos en edificios de 3 a 7 pisos, concluyendo que el CLT conformado por 3 a 5 capas posee un buen comportamiento frente a este tipo de cargas (Ceccoti et al, 2009) y (Sandhass et al, 2009). De esta forma, se ha explotado la capacidad estructural del CLT a través de construcciones de diferentes alturas, siendo el edificio más alto el Murray de Londres, cuya estructura principal es en base al CLT (Yates et al, 2008). Considerando lo anterior, en un contexto sísmico como lo es el de Chile, la utilización de CLT en edificaciones aparece como una alternativa con bastante potencial, puesto que presenta un buen desempeño estructural ante las necesidades, tanto dinámicas como estáticas.

La crisis climática requiere de soluciones y procesos constructivos que disminuyan el impacto medioambiental de la industria de la construcción, y el CLT se presenta como una herramienta sostenible, ya que tiene un bajo impacto en la huella de carbono. Asimismo, su producción en masa no genera una mayor alteración al calentamiento global como sí la producción de hormigón o acero. Las edificaciones en base a CLT tienen menos de la mitad del CO₂ que edificios de hormigón armado, y por último reaparece como una opción viable bastante importante por su capacidad de ser reutilizado o reciclado (Yaunis & Dodoo, 2022).

Un factor relevante a la hora de construir con madera es su susceptibilidad ante la humedad, varios estudios tratan sobre la exposición del CLT a la humedad, cuya consecuencia deriva en la presencia de hongos y termitas si no se protege debidamente el material. Ayantele et al (2021) experimentó, durante 60 días, dejando a la intemperie un elemento de CLT, y observó cómo aumentaba, progresivamente, la humedad contenida, alcanzando un 24% de presencia de hongos de descomposición y ataques de termitas.

2.5. Barreras de humedad como elemento flexible

La idea de generar la continuidad en la estructura plegable se puede producir a través de una membrana como elemento flexible que actúe como barrera de humedad. La madera, naturalmente, concentra ciertas cantidades de agua, pero se ha comprobado que “una humedad entre un 20% y un 100% genera mayor susceptibilidad a ataques de hongos y a un posterior deterioro” (Fritz, s.f, p.60). Las barreras de humedad “*se definen como parte de un elemento constructivo con resistencia al vapor superior a $10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s/g}$... Son materiales cuya función no es detener el paso del vapor, si no permitir su paso, pero ofreciendo una gran resistencia*” (Mesquita, 2012)

Sus principales funciones son proteger a los elementos estructurales del paso de agua y del exceso de humedad, evitando las filtraciones, hacia el interior, de agua y de viento, actuando como una segunda piel (Volcan, s.f). Otras propiedades importantes a mencionar son su resistencia mecánica a la tracción, su elasticidad, su resistencia a agentes de deterioro, su facilidad de fabricación y su adecuado comportamiento ante el fuego (Mesquita, 2012).

Las membranas hidrofugas, son láminas flexibles respirables, permiten la salida del vapor que contiene la madera, lo que prolonga su vida útil. Se encuentran en base a materiales como polietileno o polipropileno, y son instaladas tanto en muros como en techumbres (Mathiesen, s.f).

Dentro de las barreras de humedad respirables, se puede encontrar el fieltro asfáltico, material compuesto por papel Kraft impregnado con asfalto, que de igual forma da paso al vapor y a la vez lo protegen del exceso de humedad. (Especificar cdt, s.f)

Existen barreras impermeabilizantes como la membrana asfáltica, compuesta por polietileno o poliéster que posee una gran capacidad de protección ante las condiciones atmosféricas, y una característica que la destaca es su resistencia mecánica y su alta capacidad de elongación (Dynal, 2021).

Por otro lado, los geotextiles son telas que pueden ser tanto tejidas como no tejidas, compuestas de fibras de poliéster, son permeables al agua, pero protegen de la humedad y agentes químicos por su alta absorción. Son, comúnmente, utilizados en la construcción de caminos, estabilización de suelos, filtros de sistemas de drenaje, entre otros. Su principal ventaja es su alta resistencia mecánica (Feltrex, s.f), un geotextil G80 tiene una resistencia a la tracción de 1200N. Esta materialidad resultó bastante llamativa para la investigación, ya que, dada su resistencia mecánica y flexibilidad, se presentó como una oportunidad para probar sus características en otro ámbito de la construcción.

3. Métodos

Frankel & Racine (2010) definen diseño como una “actividad de planificación e incrementación de nuevos productos, que incluye los subproductos de los procesos implicados como dibujos, modelos, planos y objetos fabricados”. En la investigación a través del diseño, se generan reflexiones a partir de la acción que lleva a la adquisición de nuevos conocimientos, ósea generar conocimiento a través de la práctica, lo que derivó a una investigación de índole exploratoria. De esta forma, el sondeo se realizó a través del diseño de un producto plegable continuo en base a CLT y una barrera de humedad, proceso que fue dividido en 4 fases.

La primera fase correspondió al entendimiento del plegado como método de construcción de una volumetría, para lo que se diseñó, digitalmente, un prototipo conformado por ángulos de 90°. Luego se construyó en base a plumavit y tela asemejando lo que sería el CLT con una membrana de manera esquemática, con esto se buscaba identificar la posición de la membrana y comprender la construcción del volumen final. Para la construcción del modelo se cortaron las piezas de plumavit que conformarían la estructura rígida, con las medidas obtenidas del diseño digital, luego se conformó la pieza continua de tela (fig. 10). Ya teniendo ambos elementos se realizó la combinación (fig. 12) de estos a través de alfileres, para finalizar plegando los elementos hasta conformar un volumen (fig. 13 y 14).



Figura 10: Configuración de tela como material flexible y continuo.
Nota. Elaboración propia, 2022

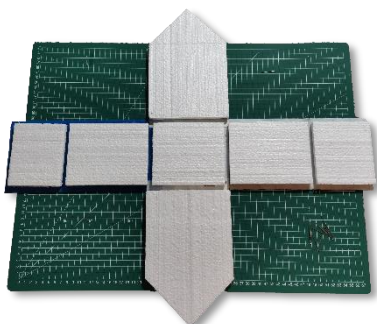


Figura 12: Combinación del elemento rígido y tela. Nota. Elaboración Propia, 2022

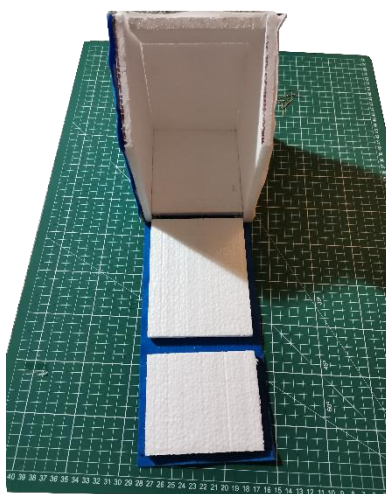


Figura 13: Plegado de la pieza.
Nota. Elaboración propia, 2022



Figura 14: Conformación de la volumetría. Nota. Elaboración propia 2022

La segunda fase correspondió a la identificación de las diversas barreras de humedad existentes en el mercado de la construcción, para la posterior elección de las más idóneas para la investigación. A partir de la revisión de literatura se encontraron tres familias de barreras de humedad, las membranas hidrofugas, las membranas asfálticas, y el fieltro asfáltico, y además se consideró la familia de los geotextiles que varían, tanto en grosor como en resistencia, desde el más bajo G10 al G80.

Tras el reconocimiento de muestras de cada familia, se descartaron las barreras que no cumplían con el requerimiento mínimo de resistencia y flexibilidad. Las membranas asfálticas se presentaron como un elemento plástico poco flexible donde su grosor no facilitaba el dobléz. El fieltro asfáltico, de igual forma, se descartó debido a su escasa resistencia, al aplicar un poco de fuerza este se desgarraba, ya que su comportamiento se asimila al de un papel.

Se reconocieron membranas hidrofugas que no se desgarraban y eran flexibles, las membranas Altewrap y Altefusión, correspondientes al fabricante Altecomercial y la membrana Ultrafieltro, correspondiente a OwensCorning, empresas a las que se les solicitaron muestras para realizar la construcción de prototipos plegables. De la misma forma se solicitó también, muestras al fabricante chileno de geotextiles G60 y 670 de Feltrex.

Para el estudio de las posibilidades de corte a realizar en el CLT, se experimentó sobre rectángulos de terciado, con los que se componía una pieza de 25 mm a la que se sometió un corte con un ángulo determinado en el borde. Se realizaron 4 ángulos de corte cuya combinación posibilitara la unión de elementos, no solo en ángulo recto, el de 90° fue realizado en la maquina ingleteadora, y los ángulos de 30°, 45° y 60° en la sierra de banco.

Una vez estudiados los componentes de la estructura plegable por separado se procedió a estudiar la combinación de estos, siendo la adhesión de la membrana a la madera un tema a considerar. A partir de las muestras de membranas obtenidas y los cortes realizados en el terciado se desarrollaron prototipos plegados compuestos por dos placas rígidas y una membrana Ultrafieltro. Según la información obtenida de Altecomercial una forma de adherir la membrana a la madera es a través de una engrapadora industrial, método aplicado en construcción de los prototipos.

De esta manera se armaron 5 prototipos (fig. 15 a 19) donde vario el ángulo de corte del terciado (90°-90°, 45°-45°, 60°-30, 90°-45°, 60°-60°), cuyo objetivo es observar el comportamiento de ambos elementos y así determinar las variables a considerar para construir posteriormente prototipos en base a tableros de mayor tamaño.



Figura 15: Unión 90°-90°. Nota.
Elaboración propia, 2022



Figura 16. Unión 45°-45°. Nota.
Elaboración propia, 2022



Figura 17. Unión 30°-60°. Nota.
Elaboración propia



Figura 18: Unión 45°-90°. Nota.
Elaboración propia, 2022

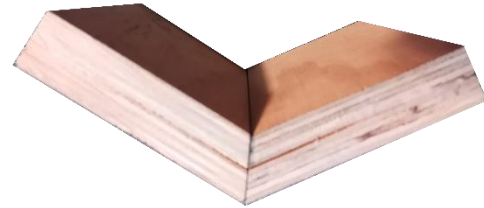


Figura 19: Unión 60°-60°. Nota.
Elaboración propia, 2022

Desde lo estudiado anteriormente, se diseñó una experimentación donde se evaluaron los 3 principales factores que componen al elemento plegable, el grosor del CLT y su el ángulo de corte, el elemento flexible y la combinación de ambos.

El experimento se realizó en base a tableros contra laminados de elaboración propia de 30cm x 30cm, se realizaron 12 tableros donde se varió grosor (4 tableros de 1', 4 tableros de 2', 4 tableros de 3') de los cuales la mitad fueron cortados en ángulos de 90° y la otra en ángulos de 45°. Para la elaboración de las piezas plegables la adhesión de la membrana a los tableros fue a través de una engrapadora industrial, en 8 puntos del tablero. De esta forma se obtuvieron 6 tipos de piezas plegables (Fig 20):

1. Pieza compuesta por dos tableros de 1' corte en 90°
2. Pieza compuesta por dos tableros de 1' corte en 45°
3. Pieza compuesta por dos tableros de 2' corte en 90°
4. Pieza compuesta por dos tableros de 2' corte en 45°
5. Pieza compuesta por dos tableros de 3' corte en 90°
6. Pieza compuesta por dos tableros de 3' corte en 45°

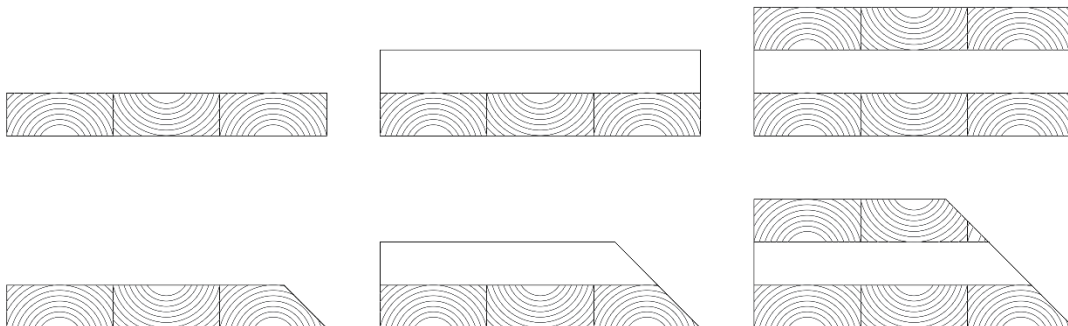


Figura 20: Tableros a utilizar en experimentación corte en 45° y 90°. Nota. Elaboración propia, 2022

Tabla 1: Piezas de CLT a utilizar en las tres experimentaciones

Variable a estudiar	Tablero a utilizar		
Grosor tablero	1' / 90°-90°	2' / 90°-90°	3' / 90°-90°
	1' / 45°-45°	2' / 45°-45°	3' / 45°-45°
Membranas			3' / 90°-90° 3' / 45°-45°
Posición de la membrana	1' / 90°-90°	2' / 90°-90°	3' / 90°-90°
	1' / 45°-45°	2' / 45°-45°	3' / 45°-45°

La primera variable a estudiar fue el grosor del tablero, se cortaron los distintos tableros en ángulos de 90° y 45°, los cuales fueron corroborados con escuadra carpintera, para luego añadir la membrana Ultrafieltro de Owenscorning, generando un elemento plegable. Al conformar la pieza plegable se evaluó la precisión del ángulo formado variando en tres posiciones el conjunto (Fig 21), con el objetivo de establecer si existe una relación entre el grosor de la pieza y la conformación del ángulo en 90°. Las herramientas de medición correspondieron a una escuadra carpintera, escuadra escantillón y trasportador.

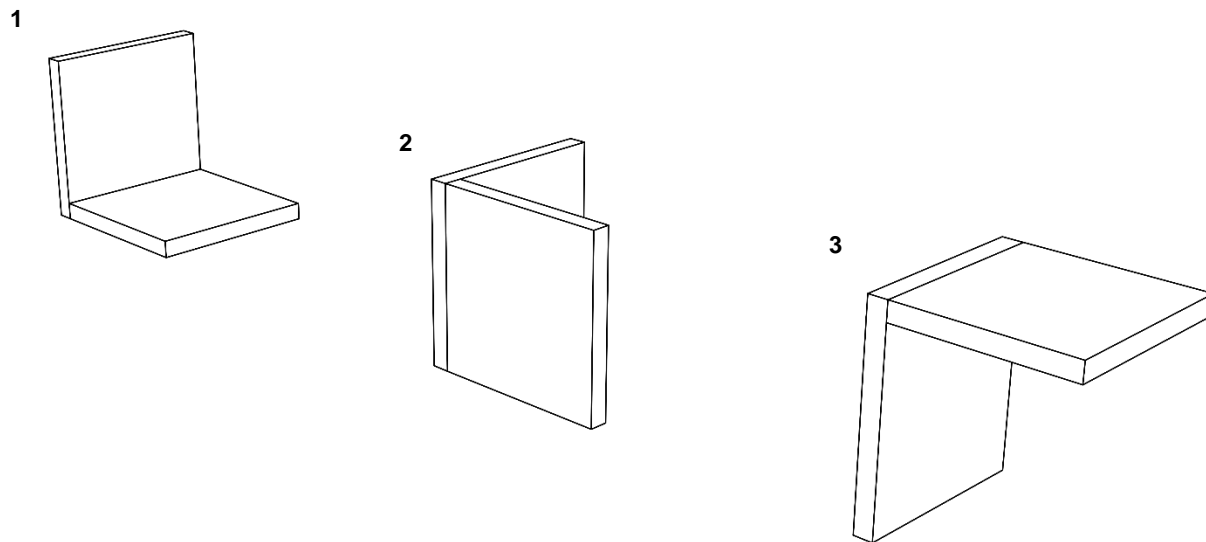


Figura 21: Posiciones en el espacio del elemento plegable

Nota. Elaboración propia, 2022

La segunda variable correspondió al entendimiento del tipo y factores de falla mecánica del elemento flexible, en donde se realizaron pruebas con las membranas hidrofuga Altewrap, Altefusión, Ultrafieltro, y geotextiles G60 y G70. La experimentación consistió en someter a la pieza plegable compuesta por 3 tableros de corte en 90° a una carga de 10,6 kg dada por metales previamente pesados (fig. 22), este ejercicio se realizó 5 veces variando el elemento flexible. La elección de esta pieza se debió a que en este tipo de ángulo de corte la membrana está sometida a un esfuerzo de corte dada la naturaleza del plegado, de esta forma se pudo observar el comportamiento de la membrana al ser sometida tanto al peso propio de la madera (3,3 Kg) como al de la carga externa (10,6 Kg).

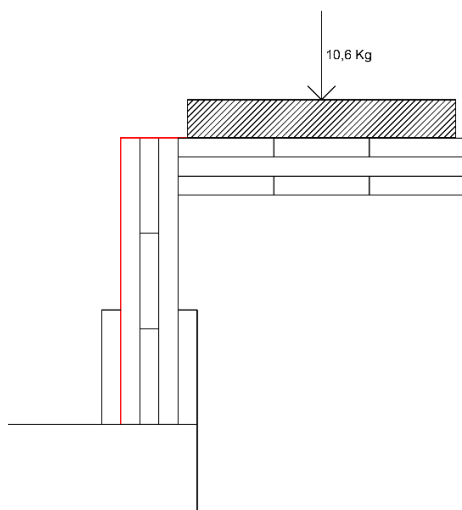


Figura 22: Esquema de experimentación con un peso Nota.
Elaboración propia, 2022

El mismo proceso se realizó con el símil de la pieza, pero en corte 45° , en este tipo de plegado es la madera la que es sometida mayormente a la carga, por lo que corresponde a un caso, totalmente, distinto al anterior, pero de igual forma se observó el comportamiento mecánico de la membrana.

La tercera variable correspondió a la posición de la membrana, para las 6 piezas plegables la posición de la membrana Ultrafieltro variaba en 0mm, 1mm y 2mm (Fig. 23 y 24). Con cada variación se medía el ángulo que alcanzaba la pieza o si existía una tolerancia, para así determinar la precisión necesaria para conformar la pieza plegable en relación al grosor y ángulo de corte del tablero. Las herramientas de medición utilizadas fueron escuadra carpintera, escuadra escantillón y trasportador.

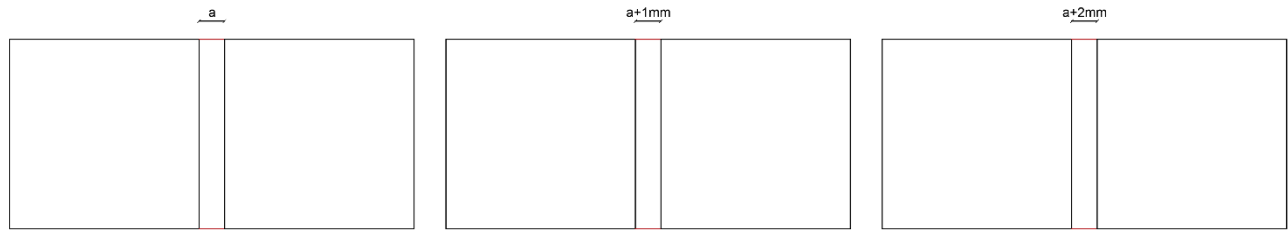


Figura 23: Esquema posición de la membrana en piezas de ángulo 90°.Nota. Elaboración propia, 2022

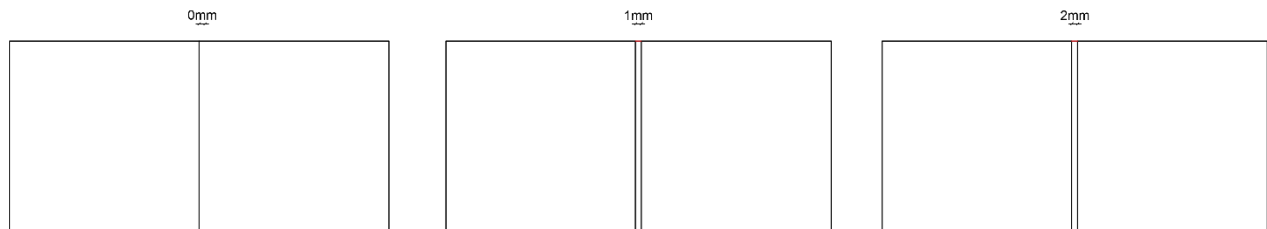


Figura 24: Esquema posición de la membrana en piezas de ángulo 45°.Nota. Elaboración propia, 2022

4. Resultados

A partir de la construcción del volumen plegable en base a plumavit se determinaron dos factores relevantes para la investigación. En primer lugar, la posición de la membrana, al generar el plegado con elementos rígidos de mayor grosor que una hoja de papel se concluyó que la membrana debe ir por fuera de la pieza, ya que así adquiere mayor relevancia para la conformación de ángulos de los elementos rígidos que serán los que generen el volumen autosoportante. Por otro lado, también se visualizó la relación de posición entre el elemento rígido y la membrana, al estar cortado en 90° el plumavit, para realizar un plegado que genere la volumetría, las piezas deben estar separadas a una distancia igual al grosor del elemento rígido (Fig. 25), lo que afecta, directamente, al tamaño de la membrana, de manera que esta debe cubrir, tanto el perímetro de las piezas rígidas como la separación de estas.

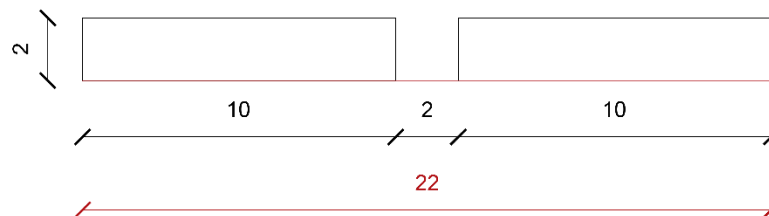


Figura 25: Distancia de separación entre las piezas rígidas.
Nota. Elaboración propia, 2022

La construcción de prototipos plegables de terciado cortado en distintos ángulos determinó 3 factores principales a considerar en la construcción de una estructura plegable. El primer factor a considerar es el tipo de ángulo a realizar en la madera para luego configurar el plegado. En cortes de 90° grados la membrana debe considerar el grosor del material para posibilitar el plegado, mientras que en cortes de 45° o 30°-60, para configurar el plegado es relevante que la membrana considere el perímetro de las piezas, más que su grosor, esto es porque al generar el plegado en piezas de 90° el largo A considera el grosor, mientras que en los otros ángulos el largo A es el mismo que el de la pieza (Fig. 26)

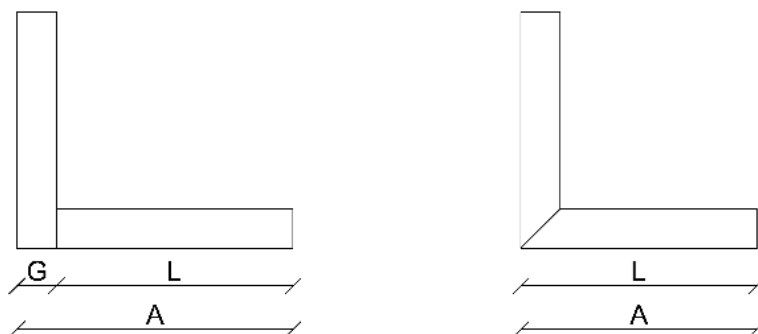


Figura 26: Largo de la membrana según ángulo de corte.

Nota. Elaboración propia, 2022

En el plegado de pieza cuyo corte es en 90° en posición tipo voladizo (Fig. 27) se observó como la membrana debe resistir la carga de la madera, de tal forma que en este tipo de plegado la solicitud de carga a la que está expuesta la membrana es mucho mayor que en el caso del corte en 45°, ya que ese plegado la pieza de madera en voladizo es soportada tanto por la membrana como por la madera. De esta forma, otro factor importante a considerar es, tanto el grosor de la barrera de humedad como su resistencia, en este primer acercamiento solo fue utilizada la membrana Ultrafieltro de grosor 0.05 mm y resistencia de 150 N/50mm.



Figura 27: Prototipo 90° en posición tipo voladizo. Nota.

Elaboración propia, 2022

El tercer factor corresponde a la posición de la membrana, al realizar el pliegue de dos piezas cortadas en 45° se logró observar que para consolidar el ángulo en 90° debió existir una separación de 1mm entre las piezas de madera (Fig. 28), mientras que en el pliegue de la unión 90°-45° esa misma separación de 1 mm genera un ángulo de 42° y no de 45°. De esta forma se descubrió que la posición de la membrana es la que determina el ángulo de la pieza, pero no existía conocimiento de si esto era dependiente del grosor de la madera o de la precisión del ángulo de corte o bien de los dos.



Figura 28: Separación entre piezas de madera en conjunto plegable. Nota. Elaboración propia, 2022

Con la construcción de las piezas plegables conformadas por los distintos tableros, para el estudio de la variable grosor, se realizó el plegado de cada pieza compuesta por tableros cortados en 90° y 45°, la membrana fue adherida al tablero de forma exacta en relación este, y se midió el ángulo obtenido en tres posiciones distintas (fig.21), obteniendo los siguientes resultados expuestos en la tabla 2

Tabla 2: Resultados ángulos obtenidos según posición en el espacio de la pieza plegada

Tipo de Pieza plegable	Posición 1	Posición 2	Posición 3
Pieza compuesta por dos tableros de 1' corte en 90°	90°	91°	96°
Pieza compuesta por dos tableros de 1' corte en 45°	90°	90°	94°
Pieza compuesta por dos tableros de 2' corte en 90°	90°	90°	96°
Pieza compuesta por dos tableros de 2' corte en 45°	90°	90°	90°
Pieza compuesta por dos tableros de 3' corte en 90°	90°	91°	98°
Pieza compuesta por dos tableros de 3' corte en 45°	90°	90°	90°

Con respecto a los resultados obtenidos, en la posición 1 (Fig 29 a Fig 34) todas las piezas alcanzaron el ángulo objetivo, lo permitió deducir que sin importar el grosor ni ángulo de corte en una posición determinada se puede alcanzar la geometrización deseada.



Figura 29: Posición 1 piezas de 1' unión 90°. Nota. Elaboración propia, 2022



Figura 30: Posición 1 piezas de 1' unión 45°. Nota. Elaboración propia, 2022



Figura 31: Posición 1 piezas de 2' unión 90°. Nota. Elaboración propia, 2022



Figura 32: Posición 1 piezas de 2' unión 45°. Nota. Elaboración propia, 2022



Figura 33: Posición 1 piezas de 3' unión 90°. Nota.
Elaboración propia, 2022



Figura 34: Posición 1 piezas de 3' unión 45°. Nota.
Elaboración propia, 2022

El punto crítico de los resultados se manifestó al variar drásticamente de la posición 1 a la 3, se observó un alto desvío del ángulo que vario entre 4° a 8° (Fig. 35), en donde solo en dos piezas se mantuvo el ángulo 90°, de esta forma se pudo establecer una relación directa entre grosor y corte del tablero, es decir, mientras la pieza tenga un mayor grosor y sea sometida a un corte en 45° mayor es la precisión del ángulo (Fig. 36).



Figura 35: Posición 3 piezas de 3' unión 90°. Nota.
Elaboración propia, 2022



Figura 36: Posición 3 piezas de 3' unión 45°. Nota.
Elaboración propia, 2022

Por otro lado, se estableció otra relación, entre grosor, ángulo de corte en 90° y membrana, cuando la posición sea en voladizo (posición 3, fig. 21) mientras más grosor tenga el tablero mayor será la desviación del ángulo, esto es porque la membrana sufrió una deformación dado el peso del tablero, lo que significó variación del ángulo.

Tras la experimentación con los 5 elementos flexibles en la pieza plegable corte en 90° (Fig. 37 a Fig. 43) se observó como cada uno de estos elementos al ser sometidos a una carga de 13,9 kg sufrirían una deformación medida en mm, valores expresados en la tabla 3.

Tabla 3: Resultados deformaciones en los elementos flexibles en plegado de corte 90°

Elemento flexible	Deformación (mm)
Membrana hidrófuga Ultrafieltro, Owens Corning	10 mm
Membrana hidrofuga Althewrap, Altecocomercial	11 mm
Membrana Alutermic, Altecocomercial	8 mm
Geotextil G60, Feltrex	10 mm
Geotextil G70, Feltrex	6 mm



Figura 37: Experimentación membrana Ultrafieltro. Nota. Elaboración propia, 2022



Figura 38: Experimentación membrana Althewrap. Nota. Elaboración propia, 2022



Figura 40: Experimentación membrana Alutermic. Nota. Elaboración propia, 2022



Figura 41: Experimentación geotextil G60. Nota. Elaboración propia, 2022



Figura 42: Experimentación geotextil G70. Nota. Elaboración propia, 2022

En el caso de las membranas, al aplicar la carga el primer punto crítico fue la utilización de corchetes para la adhesión de la membrana al tablero, a medida que la membrana se estiraba debido a la fuerza de gravedad que se daba por la carga, los corchetes al ser una fuerza puntual comenzaron a desgarrar la membrana, provocando de esta forma rupturas en los bordes de los corchetes (Fig. 43). La misma prueba fue realizada en los geotextiles, los cuales no sufrieron ningún daño de este tipo, lo que comprobó una diferencia en la resistencia al desgarro entre ambas familias.



Figura 43: Desgarro en membrana Ultrafieltro. Nota. Elaboración propia, 2022

Los 5 casos a estudiar resultaron en una deformación, esta fue menor en el geotextil como material más resistente de todos y mayor en la membrana Altewrap, pero de igual forma existió deformación, esto sucedió principalmente porque en la posición en la que se ubicó la pieza plegable, la membrana era sometida a esfuerzos de corte, esfuerzos a los que no son resistentes, ya que según sus especificaciones técnicas estas materialidades están diseñadas para resistir tracciones. Si bien

ninguno de los materiales sufrió una ruptura que pudo significar el colapso de la estructura, se observó que son materialidades que al sufrir una deformación no vuelven a su tamaño original.

A partir de los resultados anteriores, se eligieron la membrana Ultrafieltro por obtener una deformación promedio entre las otras membranas y al geotextil G70 como material con menor deformación de otra familia para realizar la misma experimentación (Fig. 44 y Fig. 45), pero con tableros cortados en 45°y una carga de 12,8 Kg (2,2 kg peso propio + 10,6 Kg carga externa), obteniendo los resultados de la tabla 4.

Tabla 4: Resultados de deformaciones de elemento flexible en plegado de corte 45°

Elemento flexible	Deformación
Membrana hidrofuga Ultrafieltro, Owens Corning	0,5 mm
Geotextil G70, Feltrex	2 mm

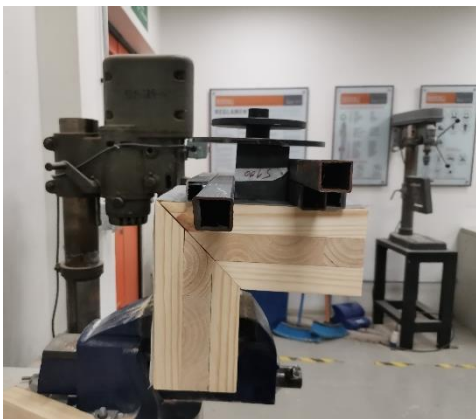


Figura 44: Experimentación con membrana Ultrafieltro. Nota.
Elaboración propia, 2022



Figura 45: Experimentación con geotextil G70. Nota.
Elaboración propia, 2022

En este tipo de plegado los tableros trabajan en conjunto para resistir la carga a la cual es sometida la pieza plegable, la membrana tensiona la pieza para mantener el ángulo de plegado y la unión de los tableros, por lo tanto, la carga que recibe la membrana es muy distinta a la del caso anterior donde se sometió a esfuerzos de tracción y no de corte, lo que dio como resultado una deformación mínima.

Para la última variable es relación a la posición de la membrana y tolerancia medida en mm, los resultados se expresaron en la tabla 5:

Tipo de Pieza plegable	0 mm	1 mm	2 mm
Pieza compuesta por dos tableros de 1' corte en 90°	90°	90°	91°
Pieza compuesta por dos tableros de 1' corte en 45°	90°	90°	92°
Pieza compuesta por dos tableros de 2' corte en 90°	90°	91°	91°
Pieza compuesta por dos tableros de 2' corte en 45°	91°	90°	91°
Pieza compuesta por dos tableros de 3' corte en 90°	90°	90°	91°
Pieza compuesta por dos tableros de 3' corte en 45°	90°	90°	91°

A partir de los resultados obtenidos, se logró identificar que entre 0 y 1mm de distancia entre las piezas se obtiene la precisión angular deseada, mientras que al aumentar la distancia 1mm variaba el ángulo en 1 grado, lo que estableció una relación directa entre mm y grados, mientras mayor sea la separación mayor será la desviación de una manera proporcional (Fig 46 a Fig 51). Por lo que no es necesaria una tolerancia, ya que en 0mm se logra el ángulo y se permite el plegado, de todas formas, el caso 4 es una desviación con respecto al resto de los resultados que no se consideró, de todas formas, la prueba podría hacerse nuevamente varias veces para entender si esta desviación ocurrió por fabricación o diseño.



Figura 46: Tolerancia 2mm en pieza 1' ángulo corte en 90°.
Nota. Elaboración propia, 2022



Figura 47: Tolerancia 2mm en pieza 1' ángulo corte en 45°.
Nota. Elaboración propia, 2022



Figura 48: Tolerancia 2mm en pieza 3' ángulo corte en 90°.
Nota. Elaboración propia, 2022



Figura 49: Tolerancia 2mm en pieza 3' ángulo corte en 45°.
Nota. Elaboración propia, 2022

5. Conclusiones

La combinación de una barrera de humedad y madera contralaminada no lograron conformar una pieza plegable autosoportante. A través del ángulo de corte realizado en el tablero se determinaron dos formas de plegado en 90°, cada una con su caracterización propia. Se logró determinar que la membrana de humedad como elemento flexible que genera el plegado posee varias limitantes, y de igual forma se establecieron ciertos criterios a considerar para realizar prototipos plegables.

Al variar la posición de la pieza plegable en el espacio, se logró determinar que las membranas de humedad o los geotextiles al ser sometidos a esfuerzos de corte sufren deformaciones, generando estiramiento del elemento sin la posibilidad de volver a su tamaño original, por tanto, esto llevado a un muro de clt (2.4mx6mx0.09m) con un peso de 609 kg la membrana sufrirá una deformación crítica que no conforme el plegado objetivo y terminará en el colapso de las partes. Por tanto, se puede determinar que las características mínimas del elemento flexible son resistencia a esfuerzos de corte y tracción, y que al ser sometidas a cargas su deformación sea elástica, es decir, vuelva a su tamaño original.

A partir de los resultados obtenidos se determina que las uniones en 45° tienen mejor desempeño que los de 90° en relación a la conformación de ángulos en distintas posiciones y a la deformación alcanzada por las membranas siendo estas las mínimas, de manera que para la generación de prototipos plegables se determina que el corte a realizar en el CLT para obtener un mejor comportamiento del conjunto debe ser en 45°.

Para conformar la envolvente plegable la posición del material flexible que otorga la continuidad de la estructura debe ser exterior a la pieza para permitir el plegado. Además, no es necesaria una tolerancia con relación a los mm de separación entre los tableros adheridos a la membrana, mientras mayor precisión exista, el plegado se conformará según el ángulo deseado sea en tableros de menor o mayor grosor, de manera que se minimizan los errores angulares si las piezas de CLT entran en contacto directo.

El fallo en la adhesión del elemento flexible a los tableros a través de corchetes, evidencia que deberá ser estudiado en un futuro nuevas formas de unión que no deterioren los elementos, es decir, que no generen rupturas o desgarros a la materialidad flexible.

Si bien en esta investigación solo se estudiaron piezas plegables compuestas solo por dos elementos rígidos, es imperante que para un futuro se realicen prototipos que incluyan más elementos, conformando por ejemplo una caja, estudiando de esta forma la variable adición, agregando más lados y como esto puede afectar al plegado, ya que la suma de elementos puede derivar nuevas limitantes o factores a considerar.

Por último, se deben considerar nuevas materialidades que aporten a la estructuración y que permitan un plegado continuo resistiendo las cargas que conlleva una estructura de mayor tamaño como un módulo habitable.

Agradecimientos

Se procede a dar los agradecimientos respectivos a los fabricantes OwensCorning, Altecocomercial y Feltrex por sus aportes con muestras de membranas y geotextiles a la investigación. De igual forma, se agradece al taller de prototipos FAU y a sus docentes por facilitar los conocimientos y entregar las herramientas para la construcción del CLT. Y por último, los agradecimientos al profesor guía Felipe López por su continuo apoyo para la realización de la investigación.

Referencias

Ayanleye, S., Udele, K., Nasir, V., Zhang, X., & Militz, H. (23 de Noviembre de 2021). Durability and protection of the mass timber structures. *Journal of Buildings Engineering* .

Buri, H., & Weinand, Y. (s.f). ORIGAMI – Folded Plate Structures, Architecture . Lausanne, Switzerland.

CLT, Solid. (s.f.). Catálogo de paneles CLT. España.

Dynal. (2021). *Membrana asfáltica*. Obtenido de Dynal: <https://www.dynal.cl/construccion/membrana-asfaltica-sbs/>

Especificar cdt . (s.f.). *Fichas técnicas fieltro asfáltico*. Obtenido de Especificar cdt: <http://www.especificar.cl/fichas/fieltro-asfaltico>

Feltrex. (s.f.). *Geotextiles*. Obtenido de Feltrex: <https://www.feltrex.cl/geotextiles/>

Frankel, L., & Martin, R. (2010). *The Complex Field of Research, for Design, through Design, and about Design* . Montreal, Canada.

Fritz, A. (s.f.). *La construcción de viviendas en madera* . Santiago .

Guindos, P. (2019). *Fundamentos del diseño y la construcción con madera* . Santiago : Ediciones UC.

Jackson, P. (2011). *Folding Techniques for Designers from sheet to form*. Londres: Laurence King Publishing Ltd.

Loyola, M., Rossel, D., Madariaga, N., & Montiel, C. (s.f.). Un método para el plegado de paneles de yeso en ángulos variables para la fabricación de productos arquitectónicos. Santiago, Chile.

Mathiesen. (s.f.). *Membrana hidrófuga respirable para muros Tyvek*. Obtenido de Construcción Mathiesen : <http://www.construccionmathiesen.cl/productos/membrana-hidrofuga-respirable/>

ONU. (16 de diciembre de 2021). *FAOSTAT*. Obtenido de <https://www.fao.org/faostat/es/#data/FO>

Stravic, M., Bogensperger, T., & Wiltsche, A. (Enero de 2015). *Generative Design for folded timber structures*. Graz, Austria. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/283518432>

Tricycle House By PAO. (s.f.). Obtenido de Gessato: <https://www.gessato.com/tricycle-house-by-pao-peoples-architecture-office/>

Van de Kuilen, J., Ceccotti, A., Xia, Z., & He, M. (2011). *Very Tall Wooden Buildings with Cross Laminated Timber* .

Volcan. (s.f.). *Barrera de humedad y sus principales funciones*. Obtenido de Volcan: <https://volcan.cl/barrera-de-humedad-y-sus-principales-funciones/>

Xilonor. (s.f.). Catálogo CLT. A Coruña, España.

Younis, A., & Doodoo, A. (10 de Abril de 2022). *Cross-Laminated timber for builing construction: A life cycle assessment overview*. *Journal of Builing Engineering*.

Anexos

- Anexo 1: Fichas técnicas membranas estudiadas
- Anexo 2: Fotografías del proceso de la construcción de los prototipos
https://drive.google.com/drive/u/0/folders/1xycs4G_96snvZ7oR5BeRCFU4airs5Zk4