

Prototipado y Manufactura Rápida en Materiales Compuestos

Conformación de volúmenes poligonales a partir de plegado de materiales compuestos sin moldes ni matrices rígidas.

Memoria para optar a título de Diseñador Industrial



Prototipado y Manufactura Rápida en Materiales Compuestos

Conformación de volúmenes poligonales a partir de plegado de materiales compuestos sin moldes ni matrices rígidas.

Memoria para optar a título de Diseñador Industrial

A mis amigos y familia, que me han apoyado en todas las decisiones que tomo. Al profesor Rodrigo Díaz, junto a todo el equipo Protean por tantas horas de trabajo y compañía. Y por último pero no menos importante, a Sofía, por su cariño, paciencia y apoyo.

A todos ustedes, muchas gracias.



“El diseño es un plan para organizar los elementos de manera tal de lograr mejoras para un propósito en particular.”

Charles Eames

Índice

Resumen	5
Planteamiento del proyecto	6
Contexto de estudio.....	6
Problemática.....	7
Oportunidad de Investigación.....	7
Preguntas de investigación.....	7
Objetivos	8
Estrategia metodológica.....	8
Alcances.....	9
Marco teórico	10
Materiales compuestos (m.c.).....	10
Componentes de los m.c.....	11
Fase primaria – matriz.....	11
Fase secundaria – agente reforzador.....	12
Polímeros reforzados con fibras (FRP).....	14
Estructuras de los FRP.....	14
Procesos de fabricación.....	15
Diseño y fabricación de moldes.....	15
Proceso de molde abierto.....	16
Proceso de molde abierto con bolsa de vacío.....	18
Propiedades de los FRP.....	19
Bio-compuestos.....	20
Investigación de los bio-compuestos.....	22
CAD/CAM.....	24
CAD.....	24
2D.....	25
3D.....	26
Modelos 3D.....	27

Métodos de modelado 3D.....	28
CAM.....	32
Prototipado rápido.....	33
Impresión 3D.....	34
Corte láser.....	35
Mecanizado CNC.....	36
Costo de uso en la FAU.....	37

Antecedentes del problema	38
Proyecto Eolian.....	38
Historia.....	38
Participación y responsabilidades.....	39
Fabricación del carenado: Eolian 3.....	40
Observaciones.....	41
Proyecto Protean.....	42
Historia.....	42
Participación y responsabilidades.....	44
Fabricación del carenado: Protean 1.....	44
Observaciones.....	48
Conclusiones.....	48
Proyecto	50
Requerimientos.....	50
Experimentación.....	54
Prototipado.....	56
Prototipos	58
Conclusiones de la experimentación.....	104
Conclusiones y aplicaciones	108
Aplicaciones al diseño.....	108
Proyecciones.....	109
Anexos	110
Bibliografía	111

Resumen

Este proyecto, enmarcado como una investigación aplicada mediante el uso de prototipos y experimentación, consiste en el desarrollo de un proceso productivo que reduce los costos y tiempos asociados a la fabricación de objetos en materiales compuestos, en contextos donde haya un volumen de producción bajo al nivel de serie corta o incluso fabricación unitaria. Para lograr el objetivo se tomaron las características de las tecnologías CAD/CAM y se vincularon con la conformación de volúmenes en materiales compuestos, un rubro donde predominan los procesos manuales. Esta investigación está enmarcada bajo el Proyecto Protean, instancia que sirvió para probar el proceso desarrollado fabricando el carenado del vehículo híbrido Protean Ackiu, validándolo en la Carrera Solar Atacama 2016.

0. Planteamiento del proyecto

0.1. Contexto de estudio

El mundo de los materiales compuestos es dinámico y versátil, siempre en constante evolución por el desarrollo de nuevos materiales, insumos y procesos, que al combinarse entregan resultados aplicables a un gran número de escenarios. La posibilidad de combinar dos o más materiales y potenciar la suma de sus características en uno solo, es una ventaja en el diseño y desarrollo de productos que da a los proyectistas la capacidad de innovar desde la materialidad del objeto, más allá de la forma que este tenga.

Según la organización JuteLab, el mercado de los materiales compuestos tiene un aumento constante del 7% por año, y tuvo una producción evaluada en \$72 billones USD en el 2014 (jute-lab.org).

Debido a esta gran presencia en el mercado, los materiales compuestos se pueden encontrar en varios escenarios. La diferencia radica en el enfoque que se le da a su aplicación. Por ejemplo, se pueden utilizar en el desarrollo de productos de consumo, como en la industria minera, donde se necesita resistencia mecánica y química o en la industria automotriz, aeronáutica y deportiva, para obtener materiales de excelente relación resistencia/peso, todo esto con altos volúmenes de producción.

Pero también se hacen presentes en el ámbito académico, donde se desarrollan objetos de estudio, que por lo general suelen ser producciones de series cortas o unitarias. En este contexto, donde los recursos disponibles y los tiempos de trabajo pueden ser bastante acotados, el trabajo con materiales compuestos puede verse condicionado. Esto se debe a que se necesita una gran inversión de estos factores en la fabricación de objetos con materiales compuestos, específicamente en los moldes y matrices, que podría no justificarse debido al bajo volumen de producción, o al no recibir ingresos por su venta.

El Proyecto Protean, de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Chile, cabe dentro de esta categoría. Este tiene como principal objetivo la generación y traspaso de información en temas respectivos a la innovación, biomateriales, sustentabilidad y medioambiente, entre otros, enfocándose en la electromovilidad como plataforma de aplicación, siempre en relación con las disciplinas creativas y proyectuales practicadas en la Universidad, ya sea en la FAU u otras facultades. Es por eso que en el desarrollo de los vehículos del proyecto, el costo y tiempo de fabricación podría condicionar el uso de materiales compuestos, dejando de lado un área de estudio que todavía tiene mucho campo de investigación.

0.2. Problemática

En materiales compuestos, el proceso de laminado de polímeros reforzados con fibras (FRP) permite la conformación de elementos laminares con una gran cantidad de prestaciones, debido a la combinación de las propiedades de los materiales que los componen. La calidad de estos compuestos, en cuanto a morfología y características funcionales, dependen directamente de la calidad de los moldes y matrices con que se fabriquen. Por lo general la fabricación de estos elementos es un proceso costoso y duradero que absorbe mayor cantidad de tiempo y recursos que el laminado en sí. Si bien estos moldes pueden ser fabricados utilizando la ayuda de tecnologías de fabricación asistidas por computadora (CAM), muchas veces sus dimensiones no permiten el uso de dicha maquinaria, obligando a realizar un trabajo combinado CAM con trabajo manual. Esto implica una posible disminución de la precisión del resultado, y un posible aumento de costos y tiempo de fabricación.

El problema radica en que, en un contexto académico con recursos y plazos determinados, como lo es Eolian y Protean, donde se desarrollan vehículos de estudio, el laminado de polímeros reforzados con fibras es un proceso que entrega pocas o incluso una sola pieza en materiales compuestos de dimensiones mayores a las permitidas por las máquinas CAM, por lo que los costos y tiempos implicados en la fabricación de moldes, en comparación a su vida útil por volumen de producción necesario, es bastante elevado. Además cabe destacar que estos moldes quedan en desuso después de la fabricación de la pieza laminada y debido a su materialidad (generalmente materiales compuestos también) y dimensiones, son difíciles de reciclar y almacenar.

0.3. Oportunidad de investigación

Las tecnologías de diseño y fabricación asistidos por computadora (CAD/CAM) permiten a los proyectistas reducir el trayecto entre un diseño y su fabricación, disminuyendo tiempo y costos, y aumentando la precisión del resultado, ya sea para prototipos o una pieza final. Cabe destacar que esta tecnología tiene un amplio margen en cuanto a la fabricación de geometrías y morfología, pero hay excepciones. Es por eso que el laminado de materiales compuestos aún no tiene una relación tan estrecha con CAD/CAM, solo en la fabricación de moldes como se explicó anteriormente. Por esta razón la identificación de este escenario se ve como una oportunidad para comenzar el desarrollo de un vínculo entre el proceso de conformación de materiales compuestos laminados con las características y cualidades que ofrecen las tecnologías CAD/CAM.

0.4. Preguntas de investigación

¿De que manera se puede reducir el costo y tiempo en el proceso de laminado de compuestos para fabricación de series cortas, y obtener resultados de calidad similar?

¿Cómo es posible potenciar las tecnologías CAD/CAM y sus características, directamente en el proceso de laminado?

0.5. Objetivos

General:

Desarrollar un proceso productivo de Polímeros Reforzados con Fibras (FRP) para fabricar pieles estructurales en serie corta, que reduzca la complejidad del proceso actual, logrando resultados competitivos.

Específicos:

- ▶ Investigar acerca de las capacidades productivas de los materiales compuestos y las tecnologías CAD/CAM.
- ▶ Identificar los problemas del proceso productivo de laminado de polímeros reforzados con fibras analizando experiencias anteriores.
- ▶ Identificar parámetros de fabricación mediante pruebas y experimentación.
- ▶ Validar lo experimentado mediante casos de aplicación.

0.6. Estrategia metodológica

Capítulo 1: Marco teórico

Estudio descriptivo con uso de herramientas bibliográficas.

Capítulo 2: Análisis de antecedentes

Estudio descriptivo de experiencias e instancias relacionadas al uso de materiales compuestos.

Capítulo 3: Proyecto

Estudio experimental.

Investigación aplicada en base a prototipos, utilizando la metodología de prototipado de Ulrich y Eppinger.

Capítulo 4: Conclusiones y aplicaciones

Instancia propositiva de posibles aplicaciones de los resultados obtenidos.

0.7. Alcances

Finalidad:

Este proyecto tiene como finalidad el aporte de nuevos conocimientos en área de materiales compuestos, contribuyendo con el desarrollo de nuevos procesos productivos que entreguen resultados aplicables a varios escenarios.

Limitantes:

En el transcurso de este proyecto se identificaron ciertas limitantes que tuvieron incidencia en los resultados.

- ▶ El tiempo en el que transcurre el proyecto solo permite llegar a un número acotado de resultados, dejando necesariamente algunas variables sujetas a mayor análisis y en una etapa de proyección posterior a la investigación. Además, la Carrera Solar Atacama 2016 tuvo lugar en abril de dicho año, siendo bastante útil en la obtención de feedback, pero en materia de plazos fue un hito que acotó el tiempo de acción.
- ▶ El Proyecto Protean sirvió como plataforma para el desarrollo de este proyecto de título, por lo que al estar bajo este marco se trabajó utilizando los recursos destinados para este, siendo una gran ayuda para la investigación. En este contexto, al ser un proyecto académico, los recursos destinados eran acotados y requería ciertos protocolos para su obtención, propios de una investigación de esta índole.
- ▶ Además, como requerimiento del Proyecto Protean, se optó por fabricar el carenado utilizando las tecnologías e instalaciones existentes en la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Chile, por lo que el desarrollo del proyecto de título también definió este requerimiento como base.

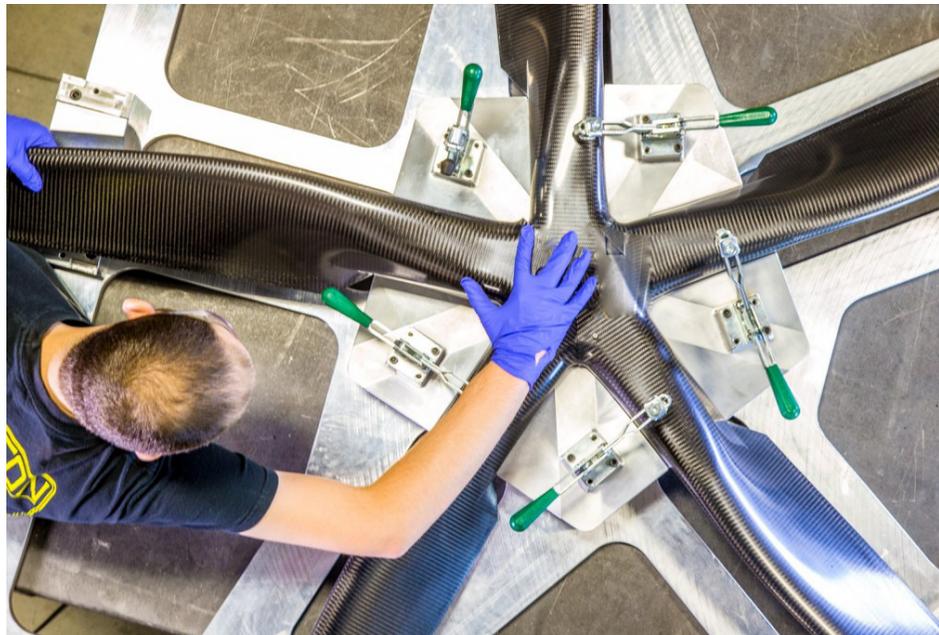
1. Marco teórico

1.1. Materiales compuestos

Cada material es único. Se les puede encontrar en diversos formatos y composiciones, las cuales nos otorgan una variada gama de propiedades y usos específicos para cada uno. Estas características nos permiten elegir el que se considere apropiado para darle la utilidad que se desee. Pero a veces se requiere utilizar las propiedades de dos o más materiales distintos para algún propósito específico. Es aquí donde nacen los materiales compuestos.

Se define material compuesto como “un sistema de materiales formado por dos o más fases físicas distintas, cuya combinación produce propiedades conjuntas que son diferentes a las de sus componentes” (Groover, 2007, p. 176).

Este tipo de materiales poseen un gran número de ventajas, dado que se puede “diseñar” el material con las propiedades que se desean. Es posible obtener un material cuya resistencia sea similar a la del acero, pero con una fracción del peso. Se les puede administrar componentes que ayuden a prevenir los efectos de la corrosión, oxidación, la radiación UV, etc. También es posible darles formas complejas mediante procesos de moldeo. Estas son solo algunas de las ventajas que presentan estos materiales, pero también, como todo, tienen desventajas. Algunas de ellas son por ejemplo, el costo asociado su fabricación, ya que los insumos suelen tener un alto valor y los procesos productivos suelen ser lentos y también costosos. Además, estos materiales suelen ser en su mayoría anisotrópicos, es decir, que sus propiedades pueden variar según la dirección en que se testeen.



Fabricación de una hélice en materiales compuestos.
Fuente: www.innovativecomposite.com

1.1.1. Componentes de los MC

En los materiales compuestos se utiliza la nomenclatura “fase” para cada uno de los elementos que los componen. Éstos se conforman mínimo por dos fases diferentes, una primaria y una secundaria, las cuales en conjunto son capaces de combinar sus propiedades y características y también lograr un efecto sinérgico de prestaciones, es decir, que se obtenga una cantidad mayor de propiedades y prestaciones en el nuevo material, que solo las de la suma de las fases. Las fases deben ser insolubles una con la otra, pero pueden tener gran adhesividad entre sí. La fase primaria se denomina “matriz” y la secundaria “agente reforzador”.

1.1.1.1. Fase primaria – matriz

La fase primaria o matriz se refiere al material que otorga la forma general del producto u objeto hecho a partir del material compuesto. Esta fase primaria se encarga de contener a la secundaria, o agente reforzador, encapsulándolo generalmente. También cuando una carga es aplicada sobre el material compuesto, la matriz y el agente reforzador comparten la carga.

La matriz se puede fabricar a partir de tres tipos de material: metal, cerámicos y polímeros. Para este proyecto se investigaron únicamente los compuestos de matriz polimérica o PMC, debido a que son el tipo de materiales compuestos usados a mayor escala.

Compuestos de matriz polimérica – PMC

Los polímeros termofijos, es decir, polímeros que tienden a quemarse y destruirse si se les aplica temperatura elevada, por lo que no pueden volver a fundirse, son los más utilizados como fase primaria en materiales compuestos. Este tipo de resinas se encuentra en estado líquido y para que sea utilizada, debe ser mezclada con un agente catalizador, el cual crea un entrecruzamiento de los enlaces de cadenas poliméricas, resultando así en un polímero sólido duro. Para optimizar el tiempo de curado de la resina, se le puede aplicar temperatura y presión.

Existen varios tipos de resinas que se utilizan como primera fase. Las más utilizadas en el mercado son las resinas de poliéster, viniléster, epóxicas. Estas últimas son las que ofrecen una mayor resistencia al ser utilizadas en materiales compuestos como primera fase, siendo ocupadas para fabricar piezas automotrices, aeronáuticas, y otras piezas de alto rendimiento.

Propiedad	Unidades	Epoxi	Poliéster
Resistencia a tracción	MPa	35-100	40-90
Resistencia a compresión	MPa	100-200	90-250
Coef. de dilatación térmica	$\times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$	60	100-200
Contracción de curado	%	1-2	4-8
Tiempo de uso		70-100 min	15-20 min
Tiempo de endurecimiento		24-36 hrs	40-60 min
Precio	CLP \$	23.000	8.000

Tabla comparativa de resinas termoestables.
Fuente: Groover, 2007

1.1.1.2. Fase secundaria – agente reforzador

El otro componente de los materiales compuestos se denomina fase secundaria o agente reforzador, ya que su función es básicamente reforzar la fase primaria. Esta fase es posible encontrarla en tres formatos: fibras, partículas y hojuelas. Es común ver materiales compuestos que contengan más de un agente reforzador, como por ejemplo fibras y partículas en una matriz de resina termofija. Pero se determina que el agente reforzador principal es la fibra, y las partículas serían un agente reforzador complementario que aportaría a mejorar algunas de las propiedades del material compuesto.

Fibras

Las fibras son la fase secundaria más utilizada en los materiales compuestos de matriz polimérica. Este tipo de compuestos se denomina FRP (Fiber Reinforced Plastic).

“El refuerzo con fibras proporciona la mejor oportunidad para aumentar la resistencia de las estructuras compuestas. En compuestos con fibra reforzadora es frecuente que ésta se considere el constituyente principal, puesto que soporta la parte mayor de la carga. Las fibras son de interés como agentes de refuerzo porque la mayor parte de materiales es significativamente más fuerte en forma de filamento que en otra voluminosa. Conforme el diámetro se reduce, el material se orienta en dirección del eje de la fibra y la probabilidad de que haya defectos en la estructura disminuye en forma significativa. Como resultado, la resistencia a la tensión aumenta mucho” (Groover, 2007, p.179).

La forma y disposición que tengan las fibras dentro del compuesto determinarán el comportamiento y propiedades de este. Se pueden encontrar fibras continuas de gran longitud. Estas fibras pueden tener una composición de hilo o mecha. El hilo se compone por una serie de filamentos torcidos en el eje longitudinal de estos, mientras que la mecha consiste en filamentos no torcidos paralelos entre sí.

Uno de los formatos más comunes del a fibra como agente reforzador es la tela. Esta se compone por varias fibras, las cuales pueden ir en una dirección, paralelas entre sí (tela unidireccional) y en dos direcciones, perpendiculares entre sí (tela bidireccional). La tela unidireccional se utiliza cuando los esfuerzos que va a sufrir la pieza de compuesto solo trabajan en una dirección, como las flechas de arquería de fibra de carbono. En cambio cuando se necesita un objeto que soporte cargas en ambos ejes, es común utilizar compuesto con fibra bidireccional.

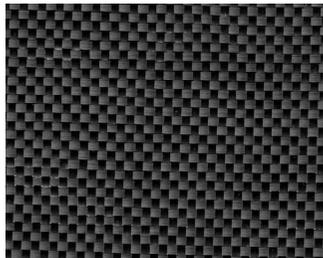
También se pueden encontrar fibras en formato discontinuo, llamadas fibras mat. Estos filamentos son de longitud corta y se posicionan de forma aleatoria sobre un aglutinante o tela de soporte para formar un paño similar al fieltro. Este tipo de agente reforzador suele darle al compuesto propiedades isotrópicas.

Para el refuerzo de algunas zonas del compuesto, como cantos o bordes, se utiliza roving, el cual es un carrete de fibras continuas en formato de hilo o mecha.

Los materiales más comunes para la fabricación de fibras de refuerzo son la fibra de vidrio, fibra de carbono y kevlar, entre otros, cada uno utilizado para propósitos específicos.

Propiedad	Unidades	F. d. vidrio E	F.d. carbono	Kevlar	Yute
Módulo de Young	GPa	72-85	225-260	125-135	35-60
Límite elástico	MPa	1400-2000	3750-4000	2250-2750	145-530
Resistencia a tracción	MPa	1900-2050	4400-4800	2500-3000	400-860
Precio x metro lineal	CLP \$	6.000	60.000	60.000	1.000

Tabla comparativa de fibras de refuerzo.
Fuente: Ashby, 2013



Fibra de carbono bidireccional.
Fuente: www.comatec.es



Fibra de Kevlar bidireccional.
Fuente: www.wisageek.com



Fibra de vidrio bidireccional.
Fuente: www.acpsales.com



Fibra de vidrio MAT.
Fuente: www.ctrmediterraneo.com



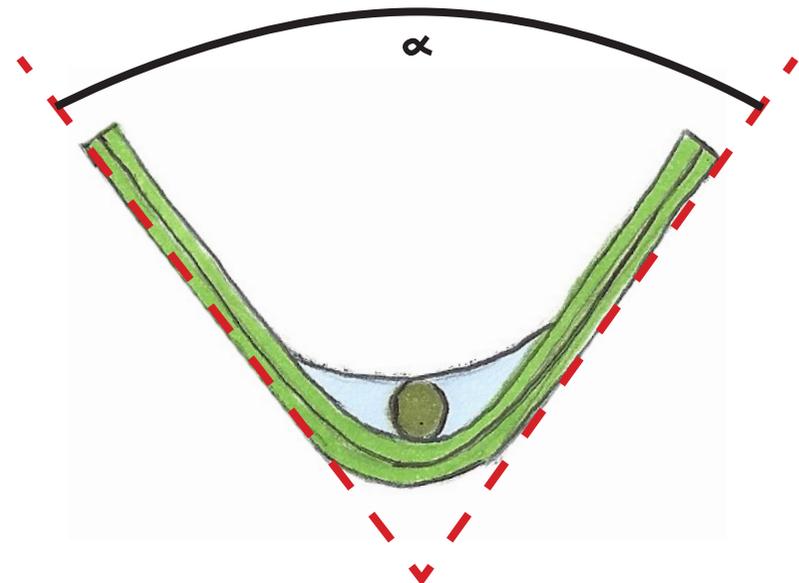
Roving de vidrio.
Fuente: www.ezentrumbilder3.de

Partículas y hojuelas – carga

Otro agente de refuerzo consta de partículas y hojuelas. Su tamaño puede variar entre microscópico, como polvos muy finos, y macroscópico, y al igual que las fibras discontinuas, se distribuyen de forma aleatoria en la matriz, resultando en que el compuesto tenga propiedades isotrópicas. Al aplicar estos agentes reforzadores a la matriz, es esta la que aumenta su resistencia, dado que las partículas restringen el movimiento de dislocación del material. Cuando se aplican partículas microscópicas, su concentración en la matriz no debe ser mayor al 15% mientras que en partículas macroscópicas su proporción aumenta a 25% o más.

Como se mencionó anteriormente, es posible utilizar estas partículas como material de refuerzo del compuesto por sí solas, pero también se pueden agregar a un compuesto de polímero reforzado con fibras en ciertos casos.

Por ejemplo, al momento de fabricar una pieza de FRP con cantos en ángulo, es necesario agregarle carga en forma de partículas al polímero en la zona de dichos cantos para que aporten al trabajo de refuerzo de la fibra. Esto se hace porque la fibra no trabaja óptimamente al doblarse en ángulos definidos.



Esquema de canto laminado en materiales compuestos.
Fuente: elaboración propia

1.1.2. Polímeros reforzados con fibras – FRP

Según lo explicado anteriormente, se define FRP como un “material compuesto de matriz polimérica incrustada con fibras de alta resistencia” (Groover, 2007).

Estos materiales compuestos llevan siendo desarrollados desde los años 30' y comercialmente son lo más populares, siendo aplicados en distintas áreas tales como automoción, industria aeroespacial, construcción, deportes, entre otros.

1.1.2.1. Estructuras de los FRP

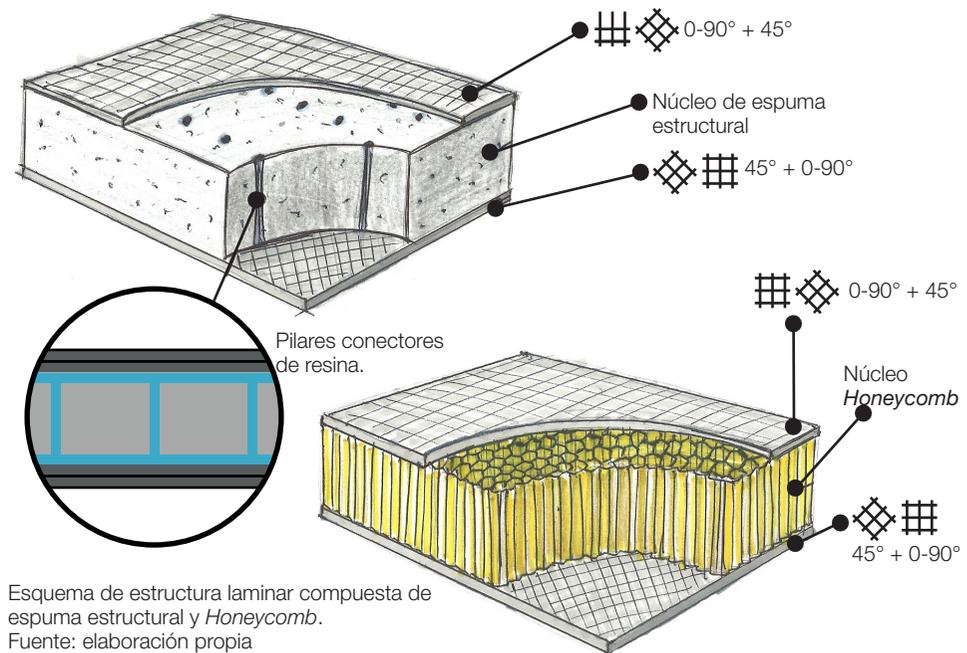
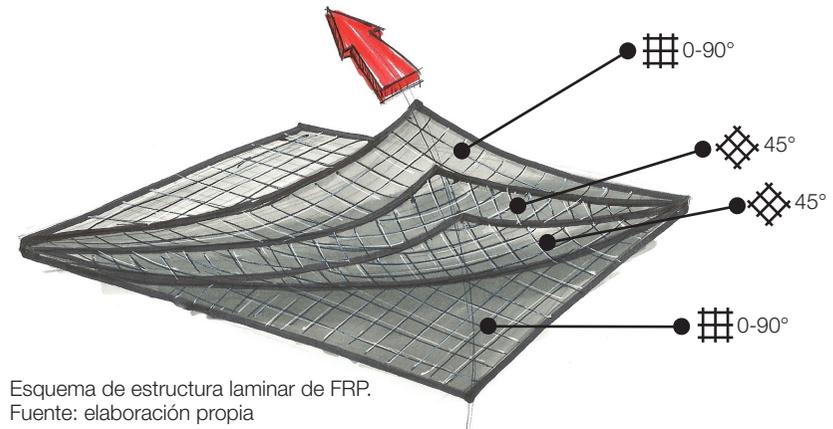
“La forma más usada de los FRP es una estructura laminar, hecha por el apilamiento y unión de capas delgadas de fibra y polímero hasta que se obtiene el espesor deseado. Al variar la orientación de las fibras entre las capas, se logra el nivel de anisotropía especificado en las propiedades del laminado. Este método se emplea para formar piezas de sección transversal delgada tales como alas y secciones del fuselaje de los aviones, paneles de carrocería de autos y camiones, así como cascos de embarcaciones” (Groover, 2007, p.189).

Estas son las estructuras laminares más básicas, pero extremadamente resistentes. Mientras más capas conformen el compuesto, mayor será su resistencia.

Existen además otros tipos de compuestos más complejos que se llaman estructuras compuestas laminares. Estas consisten en dos o más capas de materiales, frecuentemente distintos, que se unen para formar una pieza integral. Este tipo de compuestos suele tener como una de sus capas otro material compuesto, pero no es la regla. La idea en las estructuras laminares compuestas es básicamente la misma de cualquier compuesto: combinar materiales distintos para aprovechar sus propiedades en conjunto.

En FRP se utilizan con frecuencia la estructura laminar compuesta de tipo emparedado. Este compuesto se caracteriza por tener un núcleo relativamente grueso de un material de baja densidad, entre dos compuestos FRP. Este tipo

de estructuras aumenta considerablemente el grosor del laminado (y con esto su resistencia) para no tener que aplicar tantas capas de fibras y obteniendo una pieza liviana con altas prestaciones. Por lo general se utilizan materiales esponjosos como núcleo, por ejemplo espuma de PVC, madera balsa, o estructuras Honeycomb o “panal de abejas”, las cuales se utilizan en piezas de ingeniería sofisticadas como en la industria aeroespacial.



1.1.2.2. Procesos de fabricación de la FRP

Para fabricar polímeros reforzados con fibras existen varios procesos. Los más comunes son:

- ▶ Proceso de molde abierto
- ▶ Proceso de molde cerrado
- ▶ Bobinado de filamentos
- ▶ Pultrusión
- ▶ Infusión por vacío

Una de las características más importantes del desarrollo de este proyecto, que está bajo el marco del Proyecto Protean, es que su fabricación debe ser realizada en las dependencias de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo utilizando la tecnología e instalaciones disponibles. Por eso solo se tomará en cuenta el proceso de molde abierto y laminado manual. Se tomó esta decisión, porque los procesos de molde cerrado, bobinado de filamentos, pultrusión e infusión por vacío requieren maquinaria sofisticada y mano de obra calificada para su realización, cosa que sale del presupuesto y capacidades del proyecto y la facultad. Además, esta técnica ha sido utilizada con anterioridad en los carenados de los vehículos Protean anteriores y del proyecto Eolian III, fabricado también en la FAU, con resultados satisfactorios.

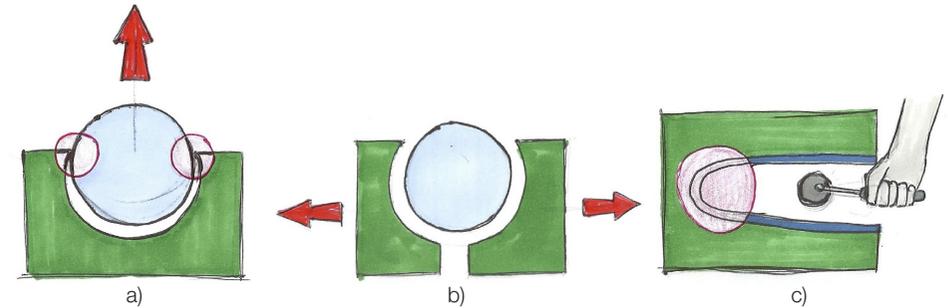
1.1.2.3. Diseño y fabricación de un molde

Dado que la pieza obtenida será de un material rígido, al igual que el molde, hay que tener ciertas consideraciones al momento de diseñarlo:

a) Que no existan retenciones del molde a la pieza. Se le llama retención cuando la geometría del molde hace que la pieza quede casada en él, logrando que el desmolde sea imposible. Por ejemplo, si se hace un molde de una esfera y este abarca más de la mitad de la geometría, no podrá desmoldarse.

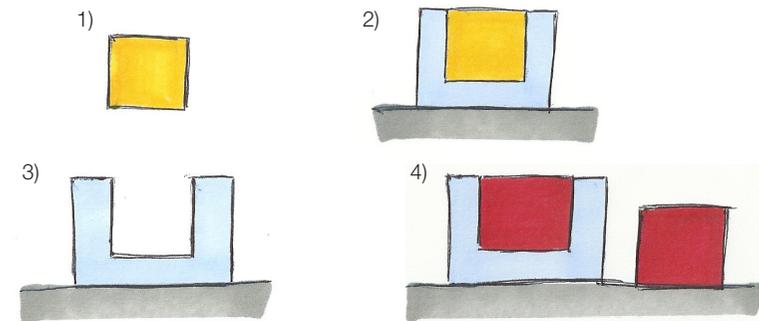
b) Para evitar retenciones en geometrías complejas, se pueden hacer varios moldes sin retención que al unirse, compongan la geometría en su totalidad. Estos deben desmoldarse individualmente para obtener la pieza.

c) El molde debe permitir el trabajo de laminado en su superficie. Si esto no es posible, se debe separar el molde en las partes necesarias hasta lograrlo, y luego unir los laminados para formar la geometría deseada.



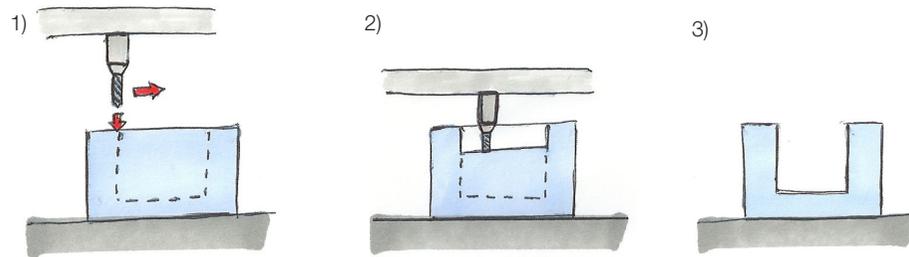
Esquema de consideraciones de fabricación de moldes.
Fuente: elaboración propia

La fabricación de un molde se puede llevar a cabo de dos formas. Una es mediante un master, que es la forma en positivo del objeto que se quiere replicar. Esta luego se usa para la obtención del molde, que sería la forma en negativo. Esta técnica se usa cuando se desea replicar una geometría existente, como por ejemplo un panel de carrocería de un auto. En este caso el panel sería nuestro master, al cual se le sacaría un molde para fabricar más paneles.



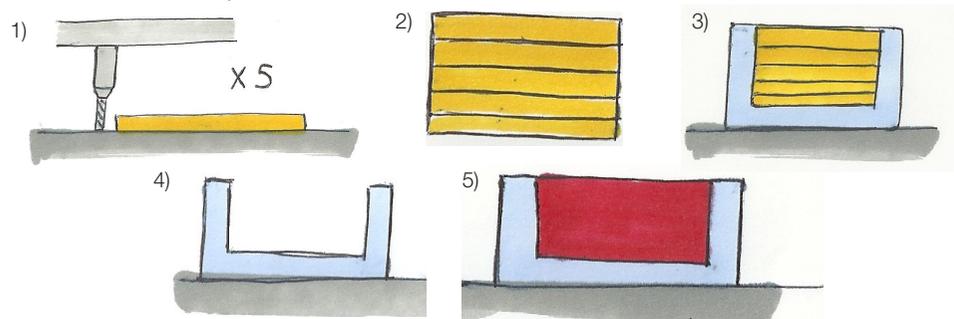
Esquema de fabricación de moldes por master existente. 1) Master; 2) Molde del master; 3) Molde del Master; 4) Replicación de piezas.
Fuente: elaboración propia

La otra forma de obtener un molde es mediante la fabricación de este directamente, sin utilizar un master. Para esto se necesitan tecnologías CNC, que permiten fabricar piezas desde lo intangible de un modelo 3d virtual. Estos moldes por lo general son de mejor calidad que los fabricados con master, dado que es una máquina la que realiza el trabajo, en cambio la otra técnica está sujeta a un mayor margen de error humano. De todas formas la superficie del molde fabricado con CNC debe ser trabajada para poder realizar el laminado sobre ella.



Esquema de fabricación de moldes por CNC. 1) Maquinado del molde; 2) Maquinado del molde; 3) Molde terminado.
Fuente: elaboración propia

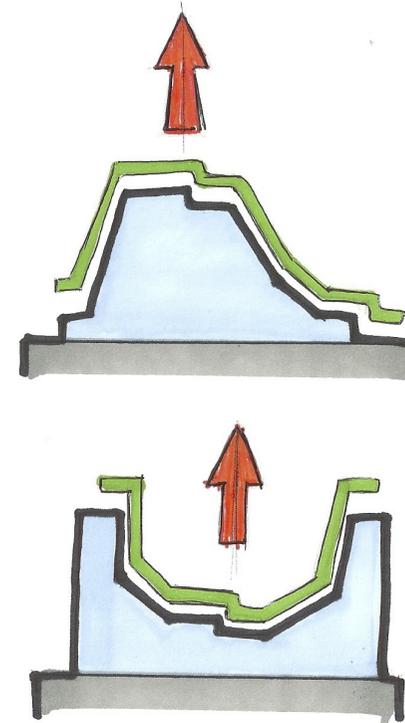
Cabe destacar que cuando las tecnologías CNC no soportan la fabricación de un molde sin master, como por ejemplo, si este supera las dimensiones permitidas por la máquina, se debe fabricar el master, como es el caso del molde del Protean 1. Por lo general, para este proceso también se usa la tecnología CNC, cortando capas que al juntarse formen la geometría deseada. Luego se debe trabajar la superficie hasta dejarla acabada según sean las especificaciones de diseño. Ahí el master estará listo para fabricar el molde.



Esquema de fabricación de moldes por master fabricado en CNC. 1) Maquinado del material laminar; 2) Fabricación del master; 3) Molde del master; 4) Molde terminado; 5) Replicación de piezas.
Fuente: elaboración propia

1.1.2.4. Proceso de molde abierto

El proceso de molde abierto combina la matriz y el agente reforzador en una superficie con la forma deseada. Como matriz es común usar polímeros termoestables como la resina de poliéster y epóxica, mientras que el agente reforzador suele ser fibra de vidrio o carbono (en tela tejida o aleatoria), kevlar o fibras naturales, entre otros. El proceso consta en posicionar capas de fibra saturada con resina hasta lograr el espesor deseado. También es posible incluir algún material de refuerzo como núcleo, si está dentro del diseño de la pieza a obtener. Finalmente se debe esperar a que la pieza tenga su proceso de curado para poder retirarla del molde. Un dato a tener en cuenta es que solo la cara de la pieza laminada en contacto con el molde tendrá una superficie acabada, la otra quedará con textura áspera, producto del laminado.

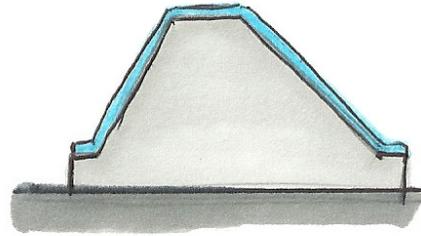


Esquema de molde abierto convexo y cóncavo.
Fuente: elaboración propia

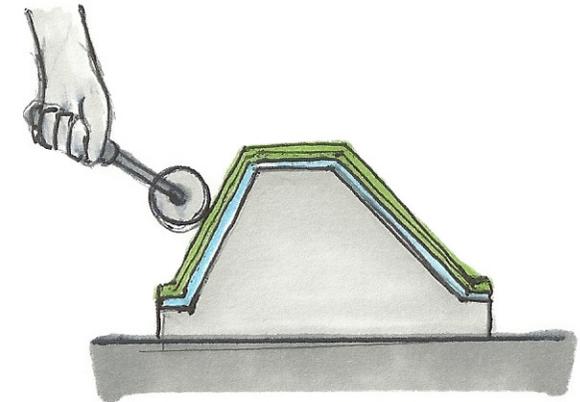
Pasos detallados de la laminación manual en molde abierto



1) Se prepara el molde limpiándolo y aplicándole desmoldante.

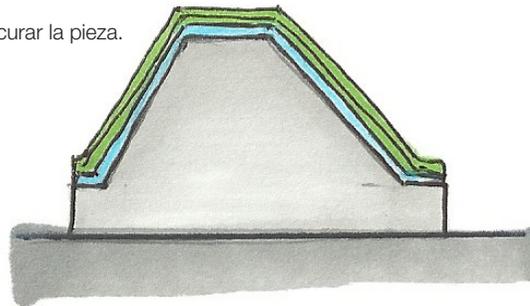


2) Se aplica una primera capa de resina con aditivos (carga, pigmento, agentes protectores, etc.) o gelcoat, que copiará la superficie del molde. Esta será la capa externa de la pieza a obtener.

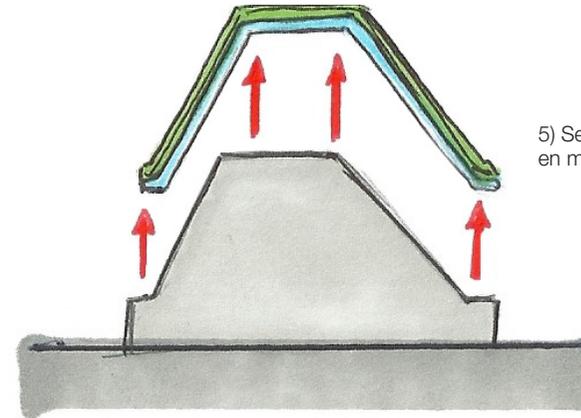


3) Cuando la primera capa de resina está en estado gel, se aplican las capas de fibra de refuerzo y se impregnan con resina para formar el compuesto.

4) Se deja curar la pieza.



Esquema del proceso de laminado en FRP.
Fuente: elaboración propia



5) Se desmolda la pieza fabricada en materiales compuestos.

“Cada capa de refuerzo de fibra esta seca en el paso 3, cuando se coloca sobre el molde. Se vacía entonces la resina líquida (no curada) o se aplica con brocha o por aspersión. El impregnado de la estera o tela de fibra se hace con rodillos de mano. A esta operación se le conoce como aplicación húmeda. Un procedimiento alternativo se realiza mediante el uso de productos preimpregnados, donde primero se preparan las capas impregnadas de refuerzo de fibra y luego se colocan en la superficie del molde. Las ventajas que se atribuyen a los productos preimpregnados son un control más estrecho sobre la mezcla de fibra y resina, y métodos más eficientes para agregar capas” (Groover, 2007, p. 325).

1.1.2.5. Laminado manual en molde abierto con bolsa de vacío

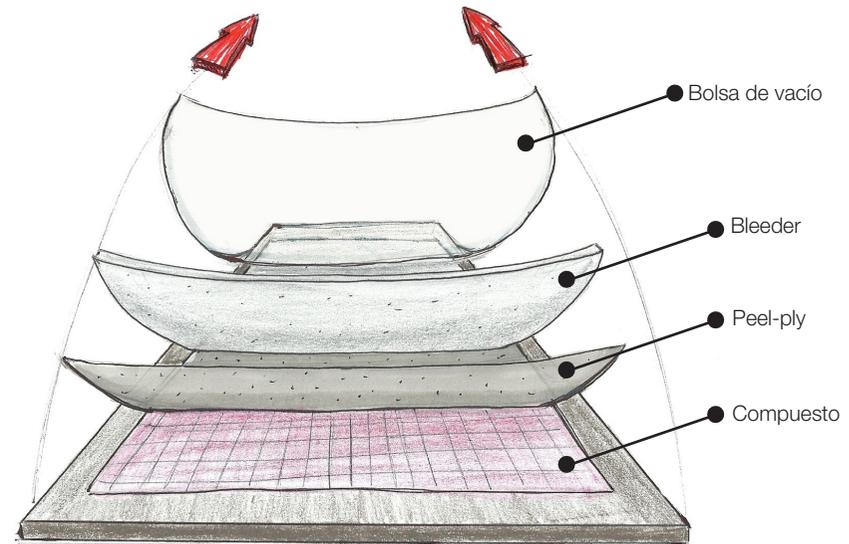
Una variación del proceso anteriormente mencionado que logra optimizar la cantidad de resina del compuesto, y por lo tanto el peso de la pieza y el costo asociado del polímero, es el laminado manual en molde abierto con bolsa de vacío.

Este proceso es bastante similar al laminado manual, salvo que al finalizar de aplicar todas las capas de resina y fibra, se deben agregar en orden los siguientes elementos:

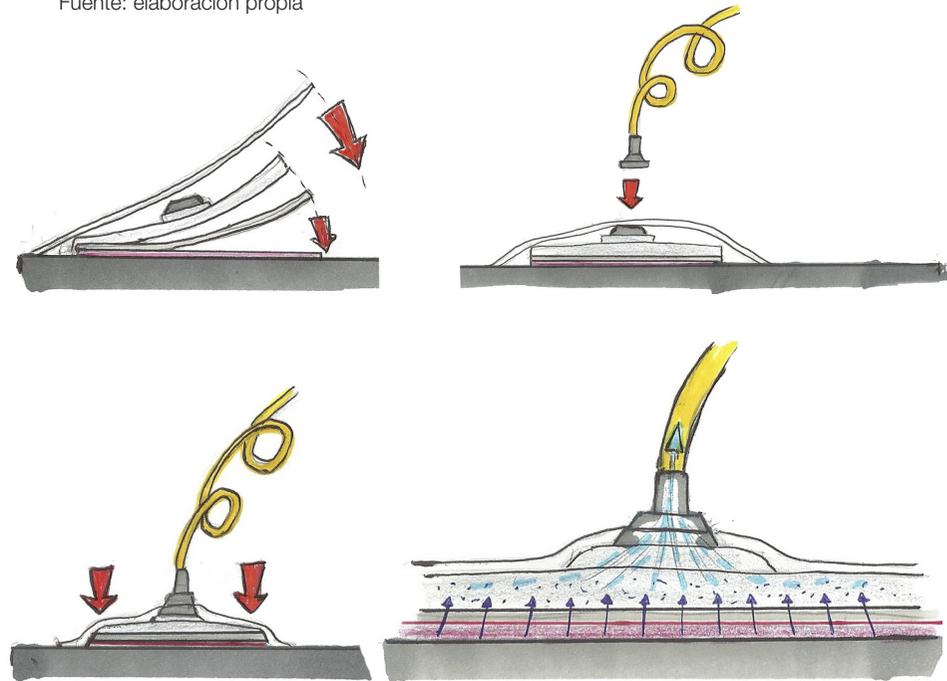
- ▶ Tela peel ply: tela sintética permeable comúnmente hecha de nylon o poliéster, que no se adhiere a la resina y permite el paso de esta a través suyo.
- ▶ Bleeder: capa esponjosa sintética que absorbe y captura el excedente de resina.
- ▶ Válvula de la bolsa de vacío.
- ▶ Bolsa de vacío: film de plástico (nylon o polietileno) que envuelve herméticamente al molde con el compuesto en su interior.

La tela peel ply se coloca sobre la última capa de fibra en el molde, como barrera entre ésta y el bleeder, ya que si no estuviera, el bleeder se pegaría al compuesto que se está fabricando.

Luego de sellar herméticamente la bolsa de vacío con el compuesto en su interior, se conecta una bomba de vacío a la válvula. La bomba absorberá todo el aire al interior de la bolsa, haciendo que esta comprima todas las capas de compuesto. Cuando no quede más aire, la bomba comenzará a absorber el excedente de resina del laminado, haciéndola pasar por el peel ply hasta el bleeder, donde quedará almacenada. Se deja curar el compuesto y, cuando esté listo se puede abrir la bolsa de vacío. Como el peel ply no reacciona con la resina, se puede despegar fácilmente para obtener la pieza final compacta y sin excesos de resina.



Esquema de los componentes del laminado al vacío.
Fuente: elaboración propia



Esquema del funcionamiento del vacío.
Fuente: elaboración propia



Fotografía de laminado al vacío.
Fuente: fotografía del autor

1.1.2.6. Propiedades de los FRP

“En la selección de un material compuesto, en general se busca una combinación óptima de propiedades, en lugar de una propiedad en particular. Por ejemplo, el fuselaje y alas de una aeronave deben ser tanto ligeros como fuertes, rígidos y tenaces. Es difícil encontrar un material monolítico que satisfaga estos requerimientos. Son varios polímeros reforzados con fibra los que poseen esta combinación de propiedades” (Groover, 2007, p.182).

Dentro de las propiedades que se encuentran en las FRP se pueden nombrar las siguientes:

- ▶ Relación elevada de resistencia – peso
- ▶ Baja gravedad específica
- ▶ Buena resistencia a la fatiga
- ▶ Bajo coeficiente de dilatación térmica, estabilidad dimensional
- ▶ Buena resistencia química
- ▶ Se pueden fabricar en formas con geometrías complejas
- ▶ Capacidad de adaptar los esfuerzos del material mediante anisotropía

Aplicaciones de los FRP



Laminado de tabla de surf.

Fuente: www.compositecorner.files.wordpress.com



Monocasco de fibra de carbono.

Fuente: www.sglgroup.com



Chaleco antibalas de Kevlar.

Fuente: www.israeli-weapons.com



Bicicleta de fibra de carbono.

Fuente: www.assets.inhabitat.com

1.1.3. Biocompuestos

Actualmente existe la tendencia mundial de utilizar biomateriales con un grado alto de sustentabilidad. Se está tratando de reemplazar los polímeros a base de hidrocarburos con alternativas que cumplan las mismas funciones, pero de origen natural y amigable con el medio ambiente en su extracción.

Existen fibras de alta gama, como el carbono o Kevlar, que se usan para fabricar objetos de altísimas prestaciones técnicas, como en la aeronáutica o elementos de seguridad. En este contexto, las biofibras aún no son competitivas, ya que no cuentan con las mismas propiedades. Pero la fibra de vidrio es a la que se apunta para ser reemplazada por fibras naturales. Según la organización JuteLab, la fibra de vidrio abarca un 83% del mercado mundial de los materiales compuestos de FRP (jute-lab.org). Es por eso que se han buscado instancias donde las biofibras puedan ser relevantes como elemento de refuerzo.

“Las fibras naturales tienen una buena resistencia mecánica, poco peso y bajo costo. Esto las ha hecho especialmente atractivas a la industria automotriz. En Europa, los fabricantes de automóviles están utilizando un estimado de 80 000 toneladas de fibras naturales al año para reforzar los paneles termoplásticos” (Año Internacional de las Fibras Naturales 2009, 2009).

Uno de los mayores beneficios de la utilización de fibras naturales en materiales compuestos, es su bajo costo energético en comparación a las fibras tradicionales, sumándole el beneficio de su cultivo al medioambiente.

“Una hectárea de plantas de yute puede absorber hasta 15 toneladas de CO₂, y emitir 11 toneladas de oxígeno durante un ciclo de cultivo de 100 días” (jute-lab.org) .

Además, su manipulación no es nociva para la salud, contrario a la fibra de vidrio o carbono, que puede producir alergias e irritación a la piel, ojos y tracto respiratorio, por las micropartículas que liberan al aire.

Otro punto a favor es su bajo costo de adquisición, siendo considerablemente más económico que el resto de las fibras de refuerzo comerciales. Esto influye directamente en el cumplimiento del objetivo de este proyecto, el cual consta en reducir los costos asociados al laminado de compuestos en FRP.

Por estas razones se ha decidido utilizar fibras naturales, específicamente yute, con resina epóxica para el desarrollo de esta investigación. El uso de yute como fibra de refuerzo está fundamentado por la investigación realizada por la diseñadora industrial de la Universidad de Chile, Patricia Campos Donoso, en su proyecto de título “Fibras vegetales utilizadas como refuerzo de compuestos FRP termoestables: desarrollo de carenado y panelería estructural” publicado en el año 2013, dónde investigó sobre las propiedades de cinco fibras naturales (fibra de palma, yute, cáñamo, junco y lino) al ser tratadas como agente de refuerzo en un compuesto de matriz polimérica a base de resina epóxica.

Propiedad	Unidades	Fibra de vidrio E	Fibra de yute
Producción global	Ton métrica / año	4,9x10 ⁶	2,8x10 ⁶
Energía gris	MJ/kg	62,2-68,8	30-33
Huella de carbono	kg/kg	3,34-3,69	1,2-1,4
Energía de tejido de tela	MJ/kg	2,48-2,73	2,48-2,73
Precio x metro lineal	CLP \$	6.000	1.000

Tabla comparativa de fibra de vidrio vs. fibra de yute.
Fuente: Ashby, 2013



Fibras de yute sin elaborar.
Fuente: wikimedia.org



Longboard de compuesto de yute.
Fuente: wikimedia.org



Tela de yute bidireccional.
Fuente: st.depositphotos.com

1.1.3.1. Investigación de biocompuestos

En la investigación de Patricia Campos Donoso, se fabricaron 25 probetas, cinco de cada fibra natural, las cuales fueron llevadas al Instituto de Investigaciones y Ensayos de Materiales (Idiem) de la Universidad de Chile, para testear y documentar sus propiedades mecánicas. Las pruebas fueron realizadas bajo la norma ASTM D 638, la cual especifica las siguientes dimensiones para las probetas.



Esquema de probetas.
Fuente: Campos, 2013

Las variables bajo las cuales se laminaron las probetas fueron las siguientes:

Presión de vacío: 1 ton/m²

Temperatura ambiente: 20° C a 25° C

Tipo de resina: epoxi 1685 (100% de resina + 50% de catalizador)

Tiempo de curado: 24 horas a 80°C

Tipo de corte: dremel con disco diamante

Laminación manual con brocha

Laminadora: Patricia Campos

También se documentó el comportamiento de las telas de fibra natural en su estado bruto, para saber que comportamiento tendría en el proceso de laminado.

Resultados y conclusiones de la investigación

Luego de realizar las pruebas, Patricia Campos Donoso llegó a los siguientes resultados:

Cuadro resumen						
tipos	Compuesto			Fibra en bruto		
Fibra	Espesor	Tensión	Elongación	Flexibilidad en seco	Costos	Peso
yute	2,4	35,72	2,7	2 cm	725 a 2230	220
cañamo	1,8	30,73	2,4	4 cm	600	277
lino	1,5	23,8	5,2	4 cm	2990	220
junco	2,8	13,19	1,9	1 cm	7000	479
palma	1,7	20,02	2,1	2	0	350

Tabla comparativa de propiedades mecánicas de fibras naturales.
Fuente: Campos, 2013

“El yute y el cañamo obtienen resultados muy similares en cuanto a tensión y elongación. La fibra de cañamo es menos procesada, por consiguiente absorbe una mayor cantidad de resina, aumentando el peso total. El yute en cambio, es la fibra más competitiva en cuanto a espesor, peso, resistencia de tensión, y adaptabilidad en curvaturas” (Campos, 2013, p. 68).

Según la investigación, la fibra de yute fue la que obtuvo mejores características para ser usada como agente reforzador en un compuesto de matriz de resina epóxica, gracias a sus propiedades mecánicas y a su comportamiento al ser laminada. Es por eso que el compuesto de yute + epoxi fue utilizado como material principal en la fabricación del carenado del Protean 1, el cual fue probado en la Carrera Solar Atacama del 2012. Luego del proceso de fabricación del carenado se llegaron a las siguientes conclusiones:

“Una fibra de yute de tejido twill, podría ayudar en la adaptación de curvas difíciles y de menor radio al ser un tejido más flexible en su estructura. [...] Por otra parte al preferir una fibra de menor gramaje se otorga la posibilidad de aplicar mayor número de capas sin aumentar de manera considerable el peso total. [...] En cuanto a la manipulación y el desarrollo de moldes, se debe considerar el peso de la fibra, ya que

tiende a caer por la gravedad y demorar más tiempo en impregnarse que la fibra de vidrio, por lo tanto los moldes deben realizarse de manera abierta, poniendo un límite de curvatura simple; en caso de ser vertical, se recomienda tener un apoyo superior o bien, disponer el molde en manera diagonal. [...] Al tratarse de una fibra natural, vegetal, su manipulación no es toxica para el ser humano, permitiendo hacer un trabajo previo aportando experiencia en la práctica manual. Sin embargo se recomienda utilizar mascarilla y guantes para evitar el traspaso de grasitud a la fibra planchada y prevenir las inhalaciones de fibras que podrían irritar los pulmones” (Campos, 2013, p. 92).

Gracias a la investigación de Patricia Campos Donoso, se pudieron obtener resultados determinantes que ratifican el compuesto de yute + epoxi como un material altamente competente en materia de fabricación de paneles. Además con su investigación, no fue necesario realizar pruebas de propiedades mecánicas de FRP con fibras naturales, lo que significó una búsqueda más acotada y específica.

1.2. Tecnologías de diseño y fabricación asistidas por computadora (CAD/CAM)

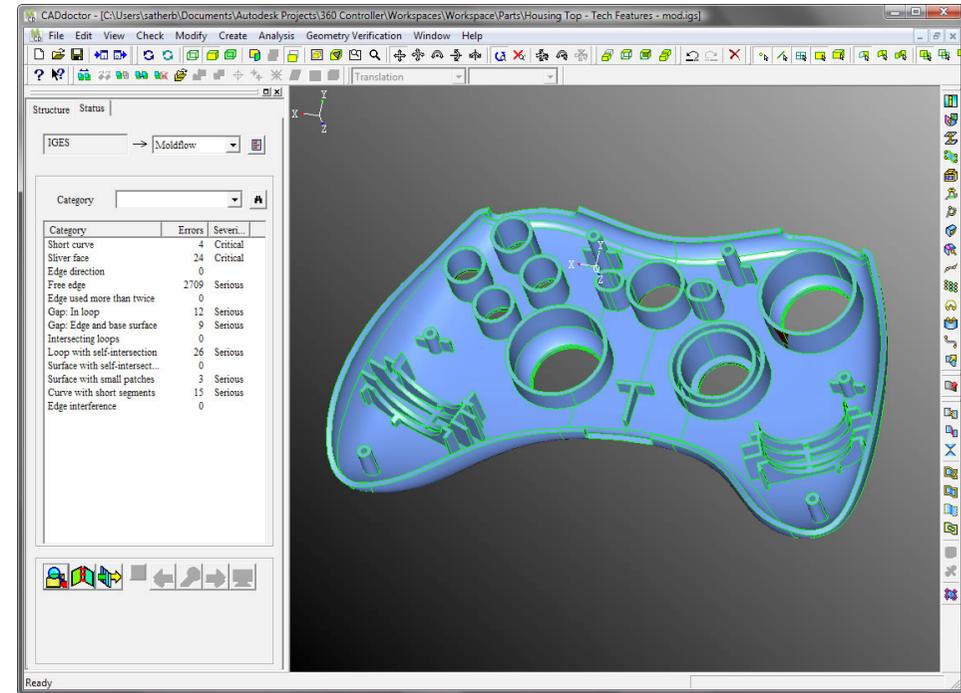
Hoy en día las nuevas tecnologías de diseño y fabricación asistidas por computadora (CAD/CAM) nos permiten llegar a resultados de diseño de manera precisa y confiable. Con los softwares de diseño es posible realizar cambios proyectuales en poco tiempo, además de realizar prototipos digitales que pueden ser sujetos a varios análisis si necesidad de ser fabricados, ahorrando tiempo y dinero. Además, las herramientas de fabricación asistida por computador pueden realizar trabajos con una altísima precisión, completamente fieles al diseño, y también fabricar piezas de geometrías complejas en una fracción del tiempo gracias al prototipado rápido.

1.2.1. Diseño asistido por computadora (CAD)

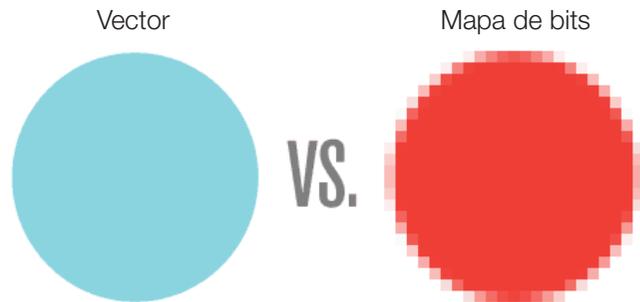
“El diseño asistido por computadora se puede definir como el uso de un sistema computacional para asistir la creación, modificación, análisis u optimización de un diseño” (Lalit Narayan, Mallikarjuna Rao, & Sarcar, 2008, pág. 3).

Para las carreras proyectistas, como diseño, arquitectura e ingeniería, donde se plasman ideas en distintos materiales de la mano de los profesionales, las tecnologías CAD permiten tener un mayor control de lo que se quiere comunicar. Los procesos de diseño se simplifican y es posible llegar a un producto final en menos tiempo. Por ejemplo, una oficina encargada de diseñar una silla puede enviarle los planos en formato digital a la fábrica ubicada en China en cuestión de minutos, en comparación a los días o semanas que podría tardar un plano físico en llegar al mismo destino.

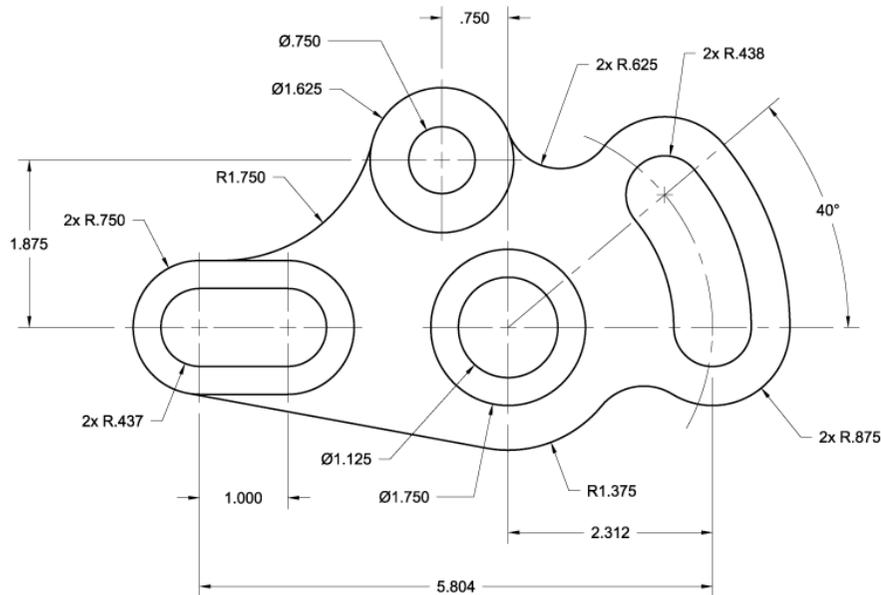
Las tecnologías CAD se pueden dividir en dos grupos: sistemas de dibujo y diseño bidimensionales (2D) y tridimensionales (3D).



Modelo 3D de carcasa de control.
Fuente: www.globalspec.com



Esquema comparativo de gráfico vectorial vs mapa de bits.
Fuente: www.cline-company.com



Planimetría CAD 2D.
Fuente: www.computeraideddesignguide.com

1.2.1.1. CAD 2D

Las tecnologías CAD 2D de interfaz gráfica datan del año 1963 con el Sketchpad, la tesis doctoral de Ivan Sutherland del MIT. El Sketchpad consta de un programa informático que permitía al usuario dibujar directamente en la pantalla de un computador mediante un lápiz óptico. En este programa era posible solo dibujar puntos, segmentos de rectas y arcos. A partir de esto se comienzan a desarrollar y a refinar las tecnologías que hoy se utilizan.

Hoy en día el CAD 2D permite a los proyectistas la generación de información respectiva de elementos en dos dimensiones, como por ejemplo, el dibujo de planos de fabricación, retoque de fotografías y dibujo digital, dimensionamiento de materiales, análisis de información de materiales y costos, entre otros.

Existen dos tipos de gráficos que se manejan con los programas CAD 2D: los gráficos vectoriales y los gráficos de mapas de bits.

Los gráficos vectoriales están conformados por elementos geométricos independientes, tales como puntos, segmentos de rectas, curvas, arcos y polígonos. Estos elementos se pueden mover, modificar o redimensionar y no perderán calidad ni resolución. Los gráficos vectoriales se utilizan generalmente para la fabricación de planos, diseño editorial o líneas de corte para herramientas de fabricación digital como corte láser o fresadora CNC.

En cambio, los gráficos de mapa de bits se configuran en una matriz de píxeles. Esta matriz se define en tres parámetros: el largo y alto, que se miden en píxeles y los bits por píxeles, que definen la cantidad de colores que pueden representarse en un píxel. Esta matriz actúa como un lienzo, en donde la combinación de colores de cada píxel forma imágenes. Si se deforman las dimensiones de la matriz, la calidad de la imagen podría disminuir, no como sucede con los gráficos vectoriales. Este tipo de imágenes se utiliza por lo general en ilustración, obtención de renders y retoque de fotografías.

1.2.1.2. CAD 3D

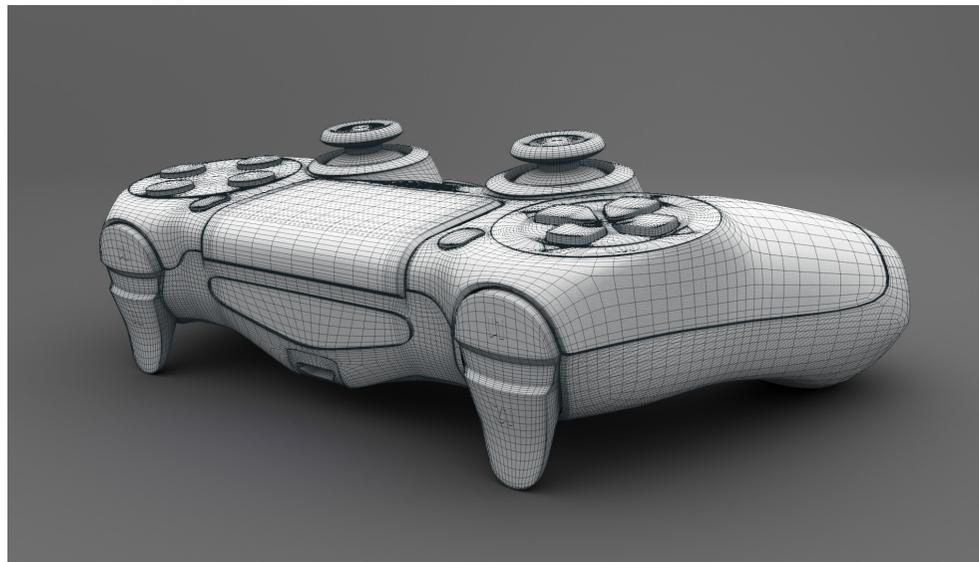
El dibujo asistido por computadora también permite la generación y visualización de modelos tridimensionales, los cuales permiten la exploración de distintos atributos de la geometría, como la forma, la iluminación, su interacción con el espacio y otros modelos 3D, etc.

“Las ventajas del modelado CAD 3D incluyen la aptitud de visualizar fácilmente la forma del diseño en tres dimensiones; la capacidad de crear imágenes realistas en foto para evaluación del aspecto del producto; la habilidad de calcular en forma automática propiedades físicas como son masa y volumen, y la eficiencia que resulta de la creación de una sola descripción justa del diseño, de la cual puedan crearse otras descripciones más enfocadas como son las vistas en sección transversal y dibujos para fabricación” (Ulrich & Eppinger, 2013, págs. 294, 295).

1.2.1.3. Modelos 3D

El CAD 3D está inmerso en una gran variedad de áreas e industrias. Se utiliza en el diseño y desarrollo de productos, arquitectura, videojuegos y medicina, entre otros. Pero para poder utilizar y visualizar los modelos 3D hay que generarlos mediante un software especializado. Con estos programas computacionales, el proyectista es capaz de representar un objeto tridimensional con una serie de elementos matemáticos, como puntos, líneas, curvas y superficies, los cuales se ubican en un mapa cartesiano (X, Y, Z).

Los modelos 3D pueden ser catalogados en tres grupos: modelos wireframe o de estructura de alambre, modelos de cáscara o superficie y modelos sólidos.

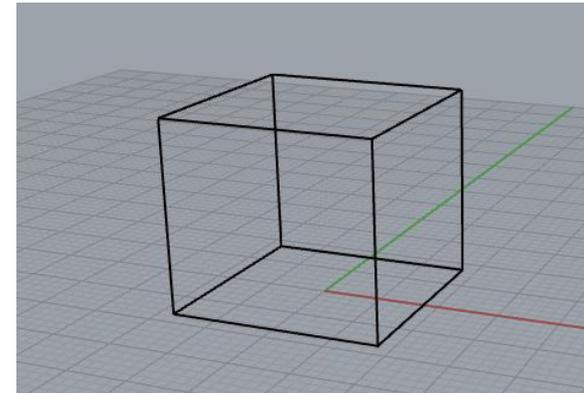


Modelo 3D de control.
Fuente: orig10.deviantart.net

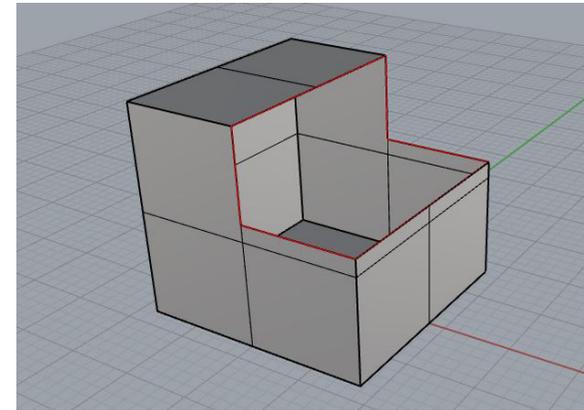
Los modelos wireframe son los más simples de representar y son aquellos que se componen únicamente por puntos (o vértices) y por líneas o curvas que los unen. Estas líneas representan los distintos bordes que pueda tener la geometría.

Los modelos de superficie o cáscara se obtienen cuando las líneas que componen el modelo wireframe son unidas mediante superficies. Cabe destacar que estas superficies no tienen grosor y solo le dan al modelo el aspecto de ser un objeto sólido. Si se observara una sección transversal de un modelo de este tipo, se vería como un cascarón. Estas superficies se utilizan en general en modelos visuales de algún objeto tridimensional, dado que solo se necesita mostrar el exterior de éste, y son ocupados para obtener renders de productos o animaciones para videojuegos o películas, por ejemplo. Pero también se pueden utilizar en el desarrollo de un nuevo producto para pruebas y análisis de ingeniería, como para el análisis de flujo aerodinámico de un automóvil por ejemplo, ya que solo se necesita la geometría exterior.

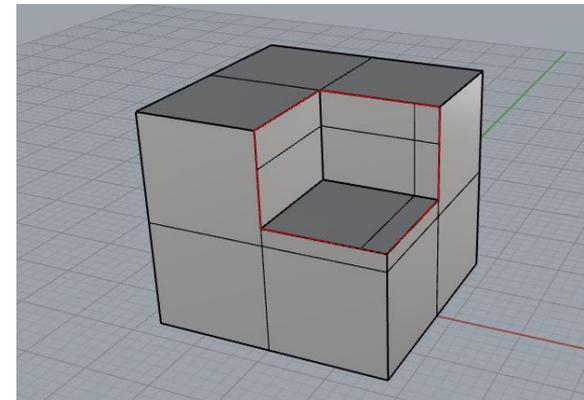
Los modelos sólidos son aquellos que pueden entregar la mayor cantidad de información. A diferencia de los modelos de superficie, estos representan la naturaleza de un objeto sólido con todas sus propiedades. Es posible asignar las características de un material específico a estos modelos, y así el computador es capaz de calcular las distintas propiedades de este según su geometría, como masa, volumen y centro de gravedad. En el diseño y desarrollo de productos, estos modelos se utilizan como prototipos virtuales analíticos que permiten a los proyectistas realizar análisis de ingeniería como esfuerzo mecánico, transferencia de calor y dinámica de fluidos. Por ejemplo, mediante estos modelos sólidos y softwares especializados es posible calcular la carga máxima que soportaría una silla fabricada a partir de polímero ABS y también conocer la deformación que tendría si se supera dicha carga. Este tipo de ensayos virtuales se conocen como análisis de elementos finitos (FEA).



Modelo *Wireframe*
Fuente: elaboración propia



Modelo de superficie
Fuente: elaboración propia



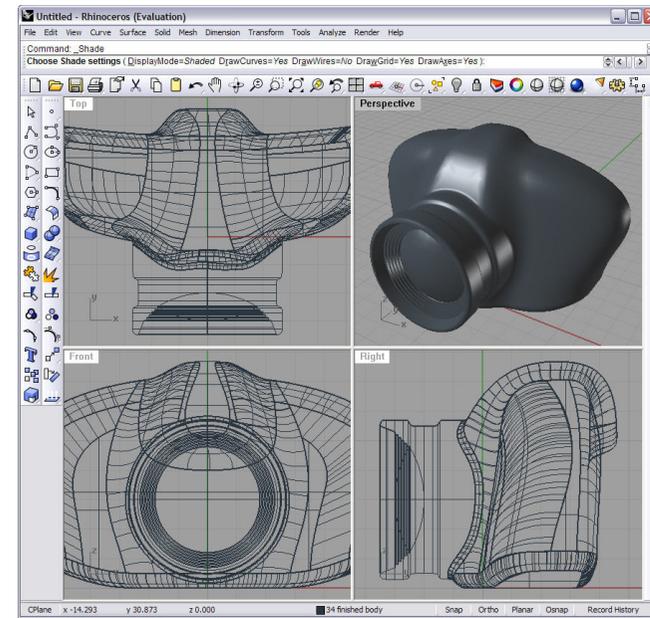
Modelo de sólido
Fuente: elaboración propia

1.2.1.4. Métodos de modelado 3D

Para generar un modelo 3D existen varios métodos que se pueden utilizar, dependiendo de la naturaleza del proyecto. Los distintos softwares de modelado 3D otorgan una gran cantidad de herramientas para poder crear modelos complejos. Además cumplen funciones complementarias al modelado, como la capacidad de animar dichos modelos, realizar renders fotorrealistas, obtener planos de fabricación y llevar a cabo simulaciones técnicas de productos para un mejor desarrollo del proyecto.

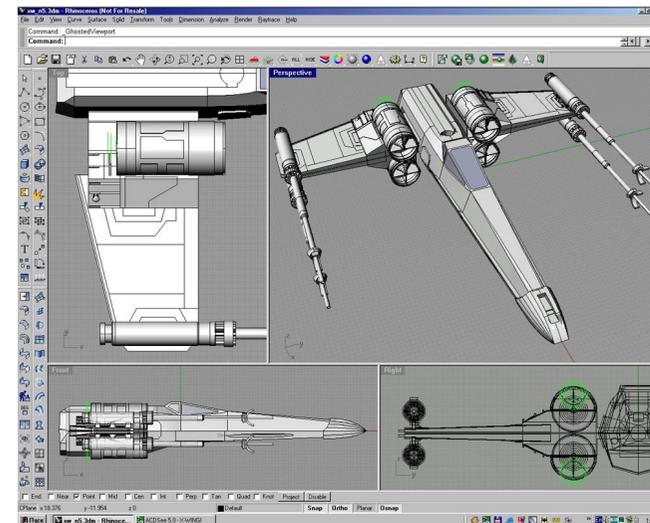
Diseño no paramétrico 3D

El diseño no paramétrico es el más simple en cuanto a la generación de modelos 3D. Este método es el más intuitivo y consta en el modelado visual de un objeto, es decir, que el usuario utiliza los comandos del software para crear puntos, líneas, superficies o volúmenes en el mapa cartesiano a través una interfaz gráfica que muestra directamente estos elementos. Estos programas no permiten la modificación de los elementos una vez modelados, por lo que se deben modelar otra vez si se requiere una modificación. Por lo general, estos programas se utilizan solo para crear y visualizar objetos 3D, dado que no permiten realizar pruebas analíticas de estos, como en los programas paramétricos de ingeniería asistida por computadora (CAE). Un ejemplo de los softwares de modelado 3D no paramétrico es Rhinoceros 3D creado por Robert McNeel & Associates.



Modelo en Rhinoceros 3D

Fuente: ontheedge.dezignstuff.com



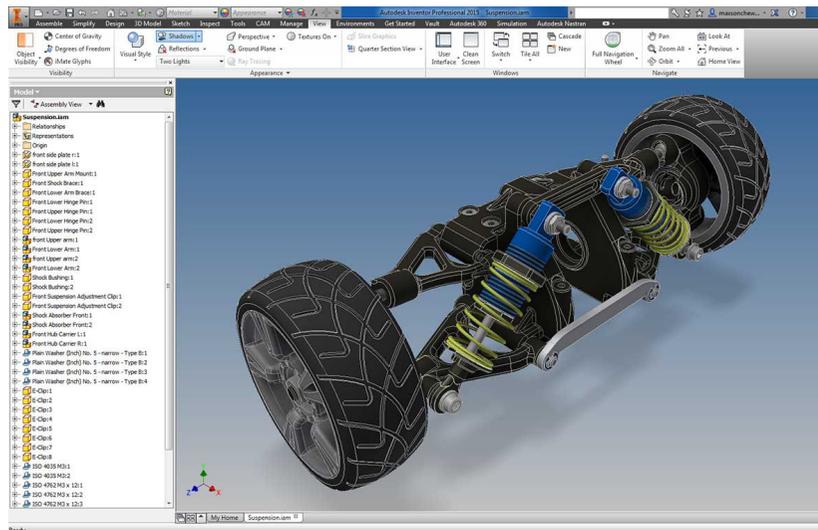
Modelo en Rhinoceros 3D

Fuente: www.3dprinter.net

Diseño paramétrico 3D

En modelado 3D, el diseño paramétrico es aquel que permite explorar la forma del modelo mediante la modificación de los parámetros o variables que la componen. Si tomamos como ejemplo un paralelepípedo, este se compone por las dimensiones de sus aristas, las cuales se pueden modificar según la necesidad del proyectista para llegar al resultado deseado. Debido a esto, no es necesario modelar de nuevo un objeto si se necesita modificarlo o cambiarlo en algún aspecto, solo basta con variar los parámetros de este.

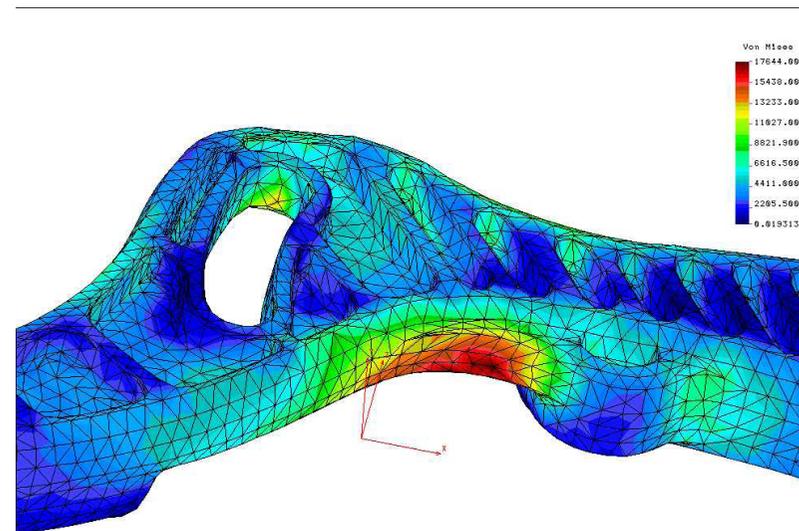
Dentro del diseño paramétrico es posible encontrar distintos tipos de software que responden a distintos procesos de modelado 3D. Al igual que en los programas de diseño no paramétrico, existen softwares que permiten al usuario utilizar comandos para modelar los diferentes elementos virtuales tridimensionales en el mapa cartesiano y visualizar el resultado al instante, con la diferencia que estos modelos pueden modificarse si el usuario decide cambiar los parámetros definidos. Cabe destacar que los programas paramétricos suelen ser más completos en cuanto a funciones se refiere, ya que permiten al usuario realizar varias funciones extra además de modelar, como herramientas de simulaciones físicas, análisis aerodinámicos, optimización de procesos productivos, etc.



Modelo en Autodesk Inventor
Fuente: www.acadsystems.com

Para el desarrollo de productos se pueden encontrar varios programas paramétricos que permiten cubrir varias aristas de la disciplina. Los softwares de ingeniería asistida por computador (CAE) cuentan con un gran número de herramientas que complementan al modelado 3D. Estos programas se basan en el diseño y modelamiento de objetos o “piezas”, las cuales luego pueden ser ensambladas para formar modelos complejos, logrando una representación fiel de un objeto o producto con todos sus componentes. Con esto es posible minimizar el margen de error al momento de fabricar, dado que se pueden evitar complicaciones como interferencias geométricas de los componentes o cantidad de material a utilizar.

Con solo modelar un objeto, se pueden reducir varios procesos dentro de un proyecto, como la generación de planimetrías, que se pueden realizar de manera casi automática con las herramientas de dibujo técnico, teniendo el modelo base. Además se les pueden asignar a los modelos las características de varios materiales, para así conocer sus propiedades y la forma en que estos pueden reaccionar en ciertas condiciones mediante análisis de elementos finitos.



Análisis de elementos finitos
Fuente: www.patriotengineeringco.com

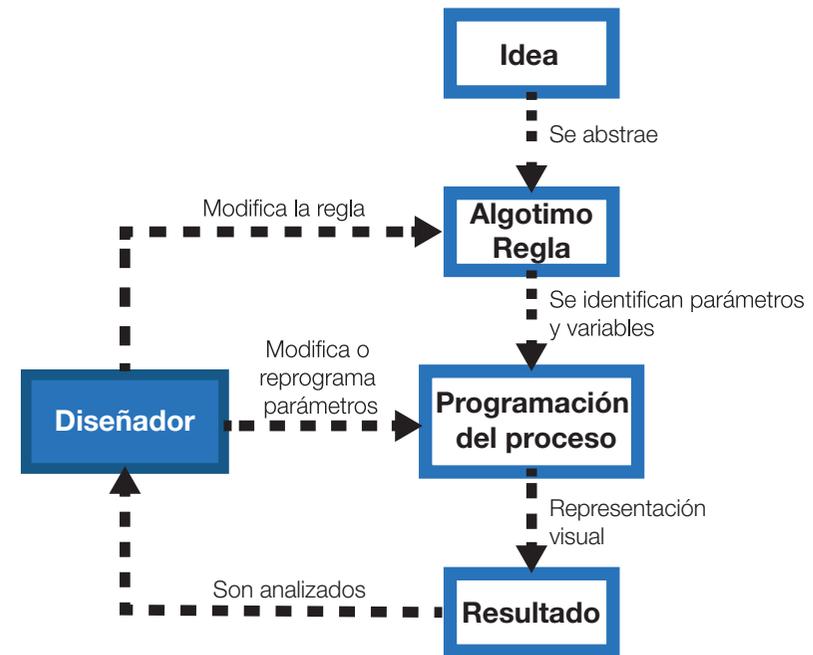
Diseño generativo

El diseño generativo es una rama del diseño paramétrico, en la cual se crean algoritmos o reglas que resultan en la creación de un modelo CAD. En esta metodología se le da más importancia al proceso creado, que al modelo resultante, dado que dicho proceso permitirá generar una amplia gama de resultados similares, modificando los parámetros que lo conforman.

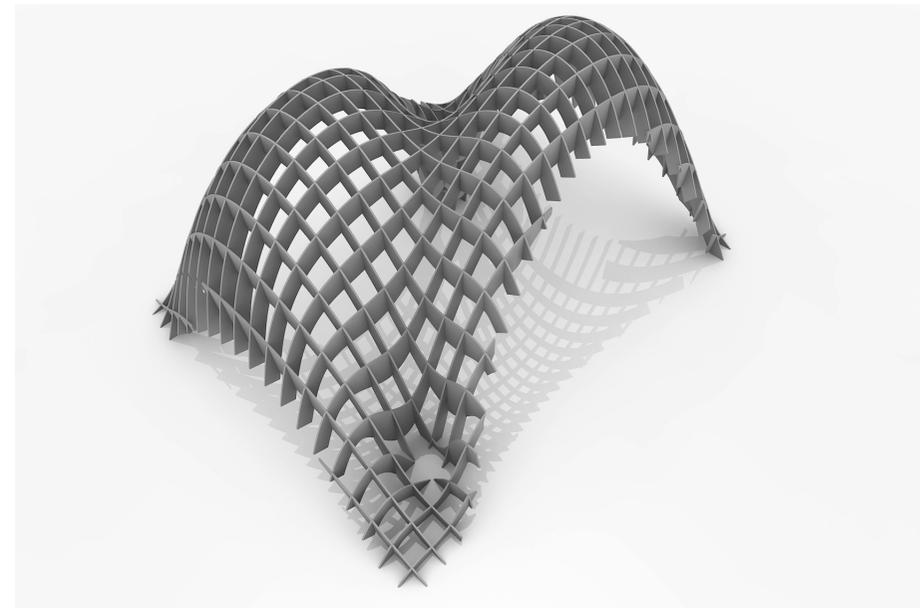
El arquitecto Jean Hernandez entrega la siguiente definición:

“Es una generación geométrica en base a una idea o concepto, que parte con la definición de una serie de parámetros iniciales matemáticos y geométricos, donde la programación de las relaciones entre ellos, no solo permiten precisar nuestro diseño para obtener óptimos resultados, sino generar un rango de posibles soluciones que la variabilidad de los parámetros originales nos permita. Es una gran ventaja para nuestro proceso de diseño, ya que no nos veremos limitados por una herramienta, sino que diseñamos nuestra propia herramienta para reducir el esfuerzo en modificaciones y generar variantes de diseño, eliminando tareas repetitivas que puedan causar un error humano. Alimentando la exploración de posibilidades de parámetros para el descubrimiento de nuevas soluciones” (Hernandez, 2012).

Cabe destacar que el diseño generativo puede implementar algoritmos que imiten el desarrollo geométrico de formas encontradas en la naturaleza. Por ejemplo, es posible desarrollar formas basadas a partir de la graficación de las funciones de seno y coseno, o también retículas modulares como los patrones hexagonales encontradas en panales de abejas o los patrones de teselación voronoi de las alas de insectos.



Esquema del proceso del diseño generativo.
Fuente: www.generative-gestaltung.de

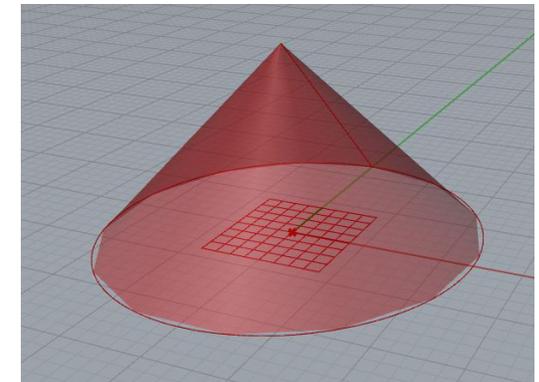
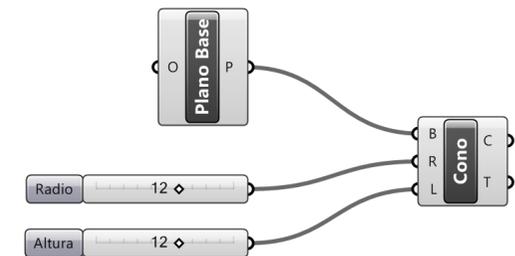
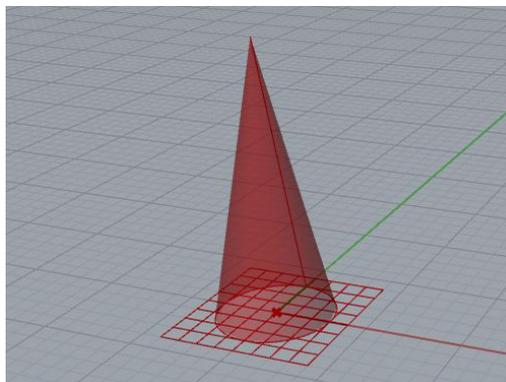
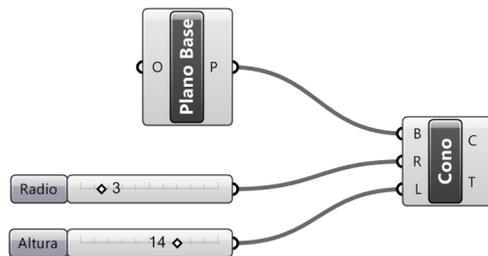
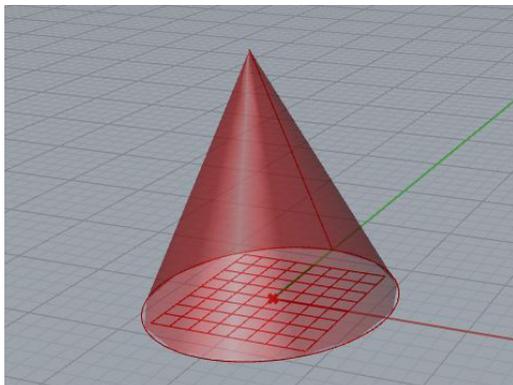
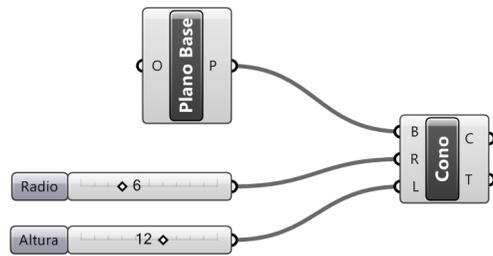


Esquema del proceso del diseño generativo.
Fuente: cidifadauna.files.wordpress.com

Grasshopper 3d

Grasshopper 3d es un software de diseño paramétrico/generativo en el cual se pueden crear los algoritmos que resultarán en modelos CAD. Este software es un plug-in para Rhinoceros 3D, y es desarrollado por la misma empresa, Robert McNeel & Associates. Grasshopper utiliza un método para realizar modelos CAD distinto al de Rhinoceros. Este programa funciona con lenguaje de programación visual, en el cual las funciones y herramientas de Rhinoceros son representadas por componentes paramétricos llamados nodos, que cuentan con entradas y salidas de información.

Para crear un algoritmo generativo, se posicionan los distintos nodos que se necesiten sobre un canvas para crear una secuencia de comandos. Los nodos se unen e interconectan a través de cables, que van desde la salida de información de uno de ellos hasta la entrada de otro nodo y así sucesivamente. De esta forma el flujo paramétrico de información del algoritmo entrega como resultado un modelo CAD que se visualiza en Rhinoceros y que además se actualiza en tiempo real si se modifica uno de los parámetros en Grasshopper.



Esquemas de diseño generativo en Grasshopper 3D.
Fuente: Elaboración propia

1.2.2. Fabricación asistida por computadora (CAM)

La fabricación asistida por computadora (CAM) consta en la utilización de un computador y programas especializados para controlar máquinas y herramientas directamente en la manufactura de un objeto, pieza o producto. Con las tecnologías CAM se pueden obtener resultados de alta calidad en poco tiempo, ya sea en una etapa de prototipado para realizar pruebas o para fabricar productos terminados. Cabe destacar que en la mayoría de los casos, el CAM se utiliza para piezas únicas y procesos no industriales. Gracias a esta tecnología es posible fabricar piezas de geometrías complejas que pueden simular procesos industriales, tales como la inyección en plástico, sin la necesidad de fabricar moldes o matrices.

“La Fabricación Asistida por Ordenador ofrece significativas ventajas con respecto a los métodos más tradicionales de controlar equipos de fabricación con ordenadores en lugar de hacerlo con operadores humanos. Por lo general, los equipos CAM conllevan la eliminación de los errores del operador y la reducción de los costes de mano de obra. Sin embargo, la precisión constante y el uso óptimo previsto del equipo representan ventajas aún mayores” (Moreno, 2003).

Esta tecnología trabaja directamente con el CAD, dado que los procesos de fabricación están vinculados directamente con los archivos generados en los programas mencionados anteriormente, ya sean de CAD 2D o CAD 3D.

Actualmente las máquinas y herramientas que se utilizan en el CAM funcionan mediante control numérico (NC), el cual es una serie de comandos y órdenes codificadas numéricamente que permiten controlar distintas operaciones de la máquina, como la posición de su elemento de trabajo (fresa, boquilla extrusora, cabezal de corte láser, etc.) en el espacio de trabajo (ejes X, Y, Z) o del plano de trabajo. Por lo general, las órdenes de control numérico son definidas automáticamente por los softwares de CAD/CAM, cayendo en la categoría de control numérico computarizado o CNC. Esto permite un alto nivel de precisión en los procesos de fabricación, ya que se reduce el potencial error humano de un operario.



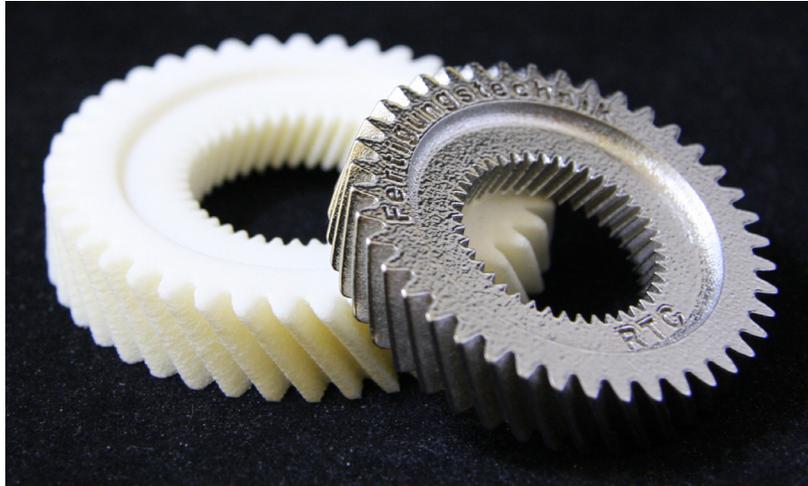
Fabricación asistida por computadora.
Fuente: wikifab.dimf.etsii.upm.es

1.2.2.1. Prototipado rápido

EL prototipado rápido es un conjunto de procesos productivos que permiten obtener objetos tridimensionales a partir de un modelo CAD en un tiempo relativamente bajo, sin necesidad de moldes ni otros procesos complementarios. Esto permite la exploración de formas y funciones de objetos, piezas, mecanismos y modelos a escala con gran precisión, facilitando el desarrollo de nuevos productos.

Existen dos tipos de procesos relacionados con el prototipado rápido: los procesos de adición de material y los de sustracción de material. Los procesos aditivos son aquellos en los que se va agregando material secuencialmente hasta lograr la forma deseada. Comúnmente se relacionan como sinónimos el prototipado rápido y los sistemas de adición de material, pero los sistemas de sustracción también caen en esta categoría. Estos son en los que se remueve material para lograr el resultado.

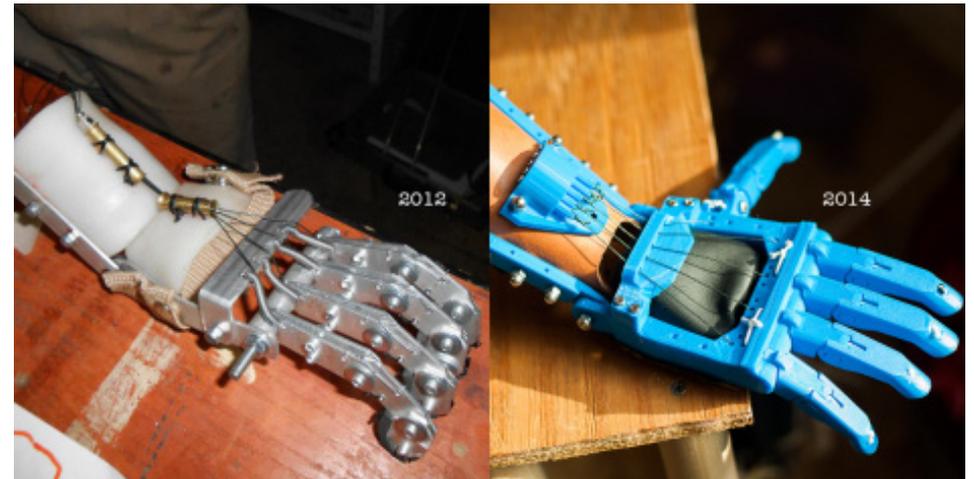
También existe un concepto llamado manufactura rápida, el cual costa en utilizar las mismas técnicas del prototipado rápido para fabricar objetos y productos terminados.



Fabricación asistida por computadora.
Fuente: cirex.nl



Férula impresa en 3D.
Fuente: cdn.thecoolist.com



Prótesis impresa en 3D
Fuente: enablingthefuture.org

1.2.2.2. Impresión 3D

Esta es una de las tecnologías más versátiles utilizadas en CAM. La impresión 3D se define como “un sistema aditivo informatizado por el cual se construyen piezas en una máquina, capa por capa, empleando diversos materiales y procesos. Esta tecnología, también conocida como fabricación de sólidos de formas libres o fabricación aditiva, ha transformado el modelismo al permitir la creación de prototipos físicos desde un ordenador (Hallgrimsson, 2013, pág. 65).”

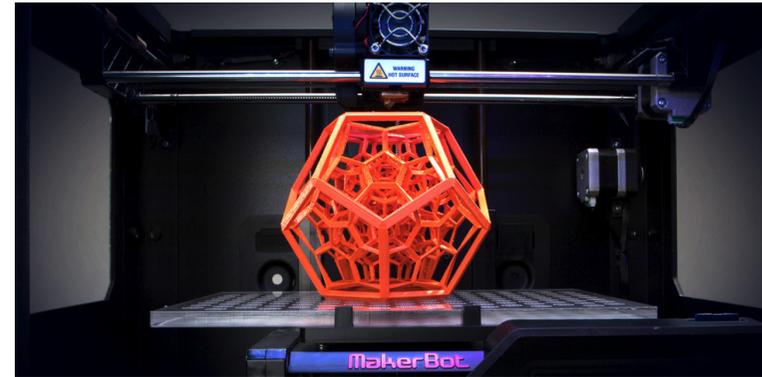
Este proceso permite crear formas complejas con un nivel de detalle muy alto, en el cual se pueden fabricar piezas funcionales, dependiendo del material utilizado, con mecanismos y geometrías internas que serían difíciles de fabricar con otro proceso. Esta es la forma más fiel de materializar un modelo CAD 3D, el cual debe ser modelado como un sólido.

Como las piezas fabricadas en impresión 3D se crean capa por capa en secciones paralelas, la calidad de estas va a depender directamente del grosor de cada capa. Mientras más delgadas sean las capas de material, la curvatura de la geometría será más fluida, ya que se notará menos la transición entre capas o “efecto escalera”. También se puede controlar la calidad del resultado con la orientación de la pieza durante la fabricación. Hallgrimsson (2013) presenta como ejemplo, que si un cilindro es construido verticalmente quedará una superficie lisa, al contrario que si se construye horizontalmente, resultando con una superficie escalonada.

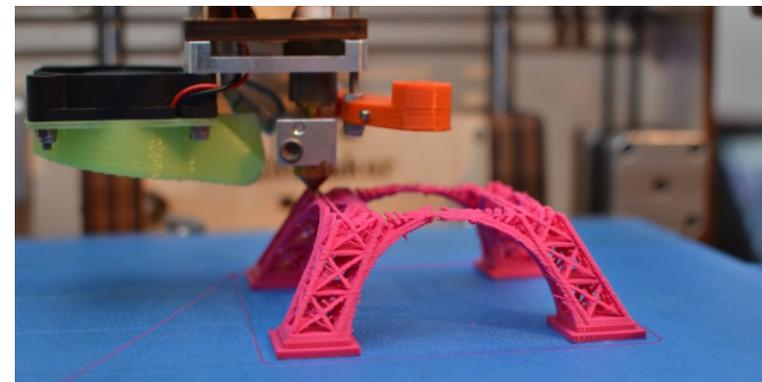
Si bien este proceso se utiliza bastante para prototipado en etapas exploratorias de un proyecto, también se utiliza como método de fabricación de piezas terminadas. Por ejemplo, en medicina se utiliza la impresión 3D para fabricar férulas en tratamientos de fracturas u alguna otra lesión. Además también se fabrican prótesis y órtesis de todo tipo. La ventaja es que cada pieza puede ser modificada en un programa CAD paramétrico para adaptarla y personalizarla a cada paciente antes de fabricarla.

Existen varios tipos de máquinas de prototipado rápido aditivo que funcionan con varios materiales como polímeros líquidos y sólidos, papel, metal y cerámicos, entre otros. A continuación se describirá solamente el sistema de modelado por deposición de fundente (FDM) que está presente en el laboratorio CNC de la FAU.

Las impresoras FDM utilizan un filamento de un polímero termoplástico que puede ser ABS o PLA, el cual pasa por un cabezal donde se calienta hasta fundirse. Este cabezal controlado por CNC, posiciona el material fundido capa por capa sobre una plataforma o cama que desciende gradualmente hasta lograr el resultado modelado en CAD.



Impresora 3d MakerBot Replicator 2x
Fuente: legislativa.hyperbydleni.cz



Impresión 3D en FDM
Fuente: www.cer-multimedia.com.ar

1.2.2.3. Corte láser

La cortadora láser es una máquina que se opera para realizar cortes y grabados en diversos materiales en formato laminar, tales como madera, cartón, papel, cuero, acrílico e incluso metal, dependiendo de la máquina. Funciona manejando por CNC el cabezal que dirige el láser de alta potencia hacia la lámina de material, siguiendo un modelo de gráficos vectoriales bidimensionales creados en un programa CAD. Se pueden regular los siguientes parámetros del láser para lograr distintos resultados: potencia del láser, velocidad de corte y resolución del láser. Además se debe configurar la máquina para el grosor del material a cortar, para obtener resultados óptimos.

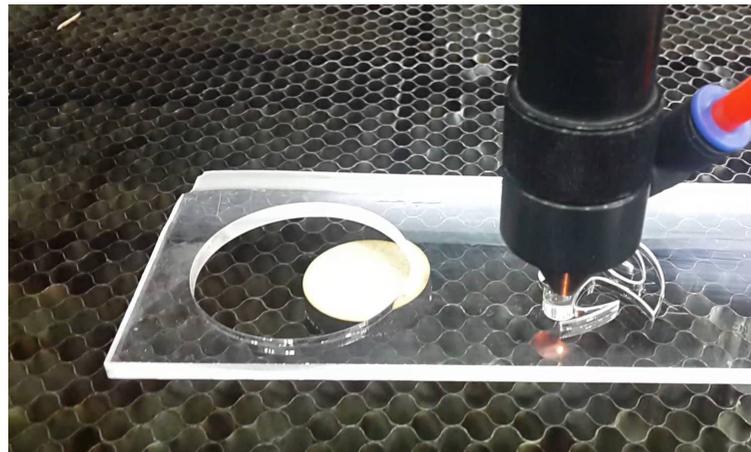
Con estas máquinas se puede lograr un corte y grabado preciso con muy alto nivel de detalle y un mínimo margen de pérdida de material. Hay que tener en cuenta que el láser sale del lente con un perfil cónico, el cual se traduce en el corte.

Dadas las altas temperaturas producidas por el láser, estas máquinas necesitan bastante ventilación al estar operando para eliminar los gases generados al quemar el material.

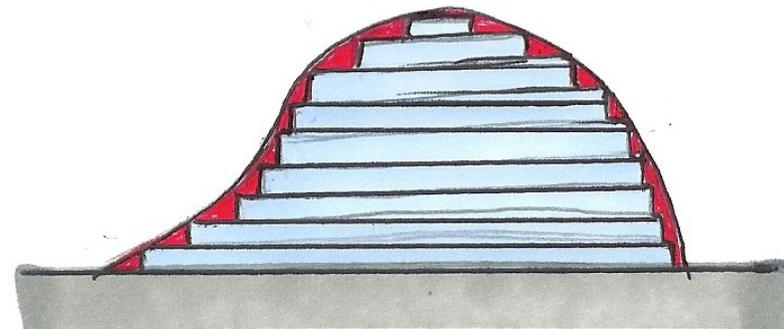
Las piezas obtenidas en este proceso están limitadas por el área útil de corte de la máquina. Además, solo se pueden obtener piezas laminares. Para lograr resultados y objetos tridimensionales con este proceso, se debe utilizar un programa CAD 3D para dividir el modelo en capas según el grosor del material a cortar, para luego unirlos después del corte. Cabe destacar que el resultado quedará escalonado, tal y como sucede en la impresión 3D.



Prototipado rápido en corte láser
Fuente: www.epiloglaser.com



Corte láser en acrílico.
Fuente: www.ytimg.com



Esquema del "efecto escalera" en prototipado rápido.
Fuente: Elaboración propia

1.2.2.4. Mecanizado CNC

“El mecanizado CNC es un proceso sustractivo que utiliza herramientas de fresado para eliminar material. Empieza con un trozo macizo de material, que es tallado hasta obtener la forma final” (Hallgrimsson, 2013, pág. 74).

Junto con la impresión 3D, el mecanizado CNC permite replicar volumétricamente los modelos creados en programas CAD. La complejidad de las piezas que se pueden obtener en este proceso va a depender de la cantidad de ejes de trabajo con que cuente la máquina.

Las fresadoras CNC se catalogan según la cantidad de ejes en los que trabajan:

3 ejes: X, Y, Z

4 ejes: X, Y, Z, donde el eje X o Y puede rotar.

5 ejes: X, Y, Z, donde ambos ejes X e Y rotan.

6 ejes: X, Y, Z, donde todos sus ejes rotan.

Se pueden utilizar varios tipos de brocas y fresas para etapas específicas del proceso. Existen fresas de desbaste para sustraer harto volumen de material y fresas más finas para realizar terminación superficial y detalles.

Cabe destacar que se debe hacer un análisis del modelo a cortar antes de comenzar el proceso, para asegurarse de que no haya intersecciones geométricas entre la pieza y la máquina. Además hay que tener en cuenta las dimensiones de la fresa (largo y diámetro) a utilizar para saber si estas pueden realizar ciertos detalles del moelo.

Dependiendo de la máquina, se pueden trabajar distintos materiales, como maderas, polímeros y metales.

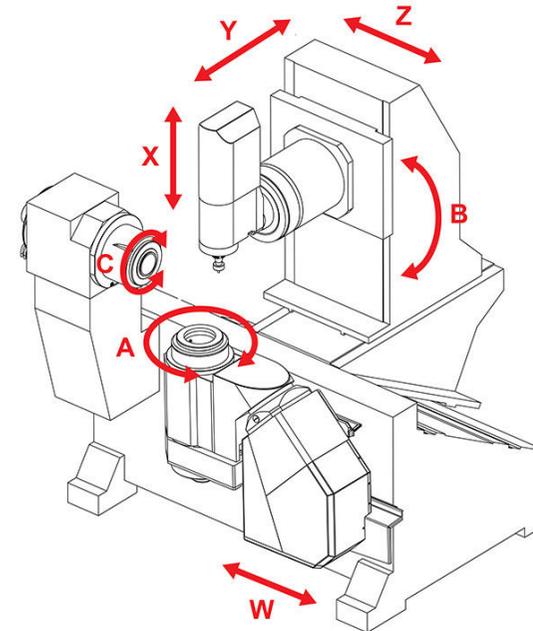


Ilustración de ejes de trabajo de fresadora CNC.
Fuente: www.directindustry.e



Maquinado en madera por CNC.
Fuente: www.3dmakers.cl

1.2.2.5. Costo de uso de las tecnologías CAM en la FAU

Para poder calcular el costo de aporte el uso de tecnología de fabricación asistida por computadora a un proceso de fabricación en materiales compuestos, se tomaron como referencia los valores de uso de dichas máquinas en el Laboratorio CNC de la FAU. Cabe destacar que para los estudiantes, el uso de estas máquinas no tienen costo, se cobra solo para proyectos externos, pero de todas formas, es un costo que está asumiendo la Facultad cuando los estudiantes utilizan estas dependencias.

Propiedad	Impresora 3D	Cortadora laser	CNC
Precio de uso CLP \$	3.000 x hora	250 x min.	25.000 x hora

Tabla comparativa de costos de uso de las máquinas CAM en la FAU.
Fuente: uad.uchilefau.cl/

2. Antecedentes del problema

A continuación se describirán los proyectos de electromovilidad de la Universidad de Chile, específicamente Eolian y Protean, para luego analizar los procesos de laminado de FRP presentes en ambos, e identificar los factores críticos que conforman el problema a resolver mediante este proyecto de título.

2.1. Proyecto Eolian

Eolian es un proyecto de la Universidad de Chile, creado por el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas en el año 2006. Tiene como fin el desarrollo y construcción de vehículos eléctricos impulsados solamente por energía solar. Se caracteriza por trabajar de forma interdisciplinaria, con estudiantes, funcionarios y académicos de distintas carreras de la universidad, como diseño industrial, ingeniería eléctrica, mecánica e industrial, cine, entre otras.



Eolian 1.
Fuente: www.sustentare.cl

2.1.1. Historia

El proyecto Eolian fue pionero en Latinoamérica al desarrollar el primer vehículo solar de la región en el año 2007. Este auto tenía una configuración de tres ruedas, dos delanteras y una trasera, algo común en este tipo de vehículos. El carenado del Eolian se divide en dos superficies continuas de fibra de vidrio, la inferior que está unida al chasis, y la superior con un tamaño de 6 m² que alberga las celdas fotovoltaicas que captan la energía solar que hace funcionar al auto. Este auto compitió en la carrera World Solar Challenge 2007 en Australia, obteniendo el puesto 14.

La segunda versión se llamó Eolian 2 y fue fabricado en el año 2011 por un equipo renovado. Se mantuvo la misma configuración de tres ruedas, pero se aplicaron mejoras en la aerodinámica y en la estructura del auto para mejorar la eficiencia energética. El chasis se construyó en base a un compuesto de fibra de carbono y espuma estructural de PVC, lo que lo hacía más ligero y resistente. La fibra de vidrio se mantuvo en el carenado, con las mismas dos superficies continuas y los mismos 6 m² para celdas fotovoltaicas, pero se construyó con un perfil que brindaba un mejor aporte aerodinámico. El Eolian 2 participó en dos competencias, con un periodo de tiempo muy breve entre una y la otra, por lo que se fabricaron dos autos. Uno compitió en el Atacama Solar Challenge 2011 en el norte de Chile, obteniendo el segundo lugar y el otro volvió al World Solar Challenge 2011 quedando en el puesto 22.

Para el Eolian 3 no se fabricó un auto nuevo, sino que se reacondicionó uno de los dos autos Eolian 2. En este auto se mejoraron algunos puntos críticos que fallaron en el modelo anterior para mejorar el consumo energético. Además se fabricó un nuevo carenado superior, al cual se le mejoraron detalles en la forma para mejorar la aerodinámica. Otra mejora del carenado fue su reducción de peso y aumento de resistencia mediante el uso de fibra de vidrio y carbono en conjunto con espuma estructural de PVC. Este auto solo compitió en el Atacama Solar Challenge 2012 quedando en el segundo puesto nuevamente.

Actualmente se está finalizando el desarrollo de la cuarta versión del auto. Este pasó de ser un triciclo a ser un vehículo de cuatro ruedas. Además este auto puede llevar a un copiloto, lo que lo convierte en el primer auto solar biplaza de Latinoamérica.



Eolian 2.
Fuente: www.lanacion.cl



Eolian 3.
Fuente: www.sustentare.cl

2.1.2. Participación y responsabilidades en el proyecto Eolian

En el año 2011 se formó parte del equipo de diseño que trabajó en el Eolian 3. Dado que este vehículo tenía como base al Eolian 2, solo se tuvieron que desarrollar y mejorar ciertos elementos del auto. El equipo de diseño tenía como principal tarea la fabricación de un nuevo carenado superior que cumpliera con mejoras aerodinámicas y estructurales. Aquí se realizaron mejoras a la cúpula del piloto, que se redujo en tamaño para que el auto tuviera menos área frontal y también se cambiaron los cantos laterales del carenado, que pasaron de ser en ángulo recto a ser curvos, esto para darle mayor resistencia y mejorar el flujo aerodinámico. Además, el Eolian 3 debía ser más ligero que su antecesor para mejorar la eficiencia de los motores, por lo que el carenado debía ser fabricado pensando en este objetivo. Se utilizó menos fibra de vidrio que en el carenado anterior, ya que se complementó con fibra de carbono y espuma estructural de PVC. Esto redujo el peso y mejoró su estructura, facilitando así su manipulación. Esto es muy importante, debido a que si el carenado realizaba movimientos de flexión o torsión, podían romperse las celdas fotovoltaicas, reduciendo drásticamente su eficiencia.

Además se fabricó un nuevo asiento para el piloto, también en fibra de vidrio, fibra de carbono y espuma estructural, para lograr un resultado bastante resistente y ligero.

Con esta experiencia fue posible adquirir amplios conocimientos teóricos y prácticos sobre todo lo que implica el proceso de laminado de piezas en FRP (master, moldes y laminado) y los factores que influyen en que se obtenga un resultado óptimo. Fue posible también trabajar con materiales e insumos de altísima calidad, como fibra de carbono y resina epóxica, que en otro contexto hubieran sido difíciles de utilizar debido a su alto costo comercial.

2.1.3. Proceso de fabricación de carenado: Eolian 3



Master Eolian 2.
Fuente: Fotografía del autor



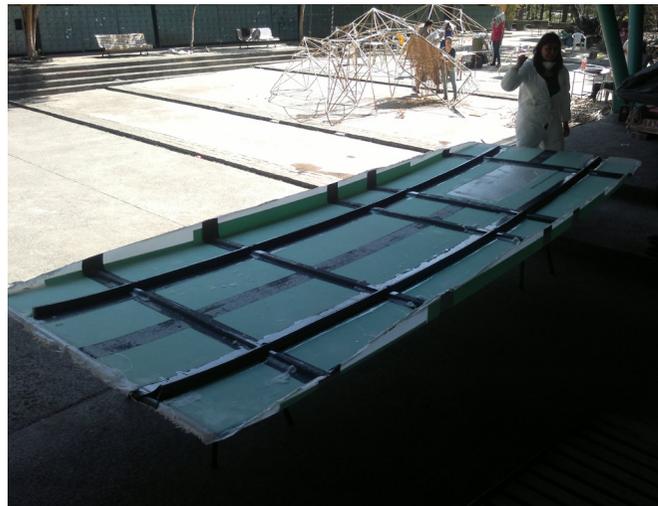
Master Eolian 2.
Fuente: Fotografía del autor



Molde Eolian 3.
Fuente: Fotografía del autor



Laminado al vacío del carenado del Eolian 3.
Fuente: Fotografía del autor



Carenado del Eolian 3.
Fuente: Fotografía del autor



Carenado del Eolian 3.
Fuente: Fotografía del autor



Cúpula del Eolian 3.
Fuente: Fotografía del autor



Carenado del Eolian 3.
Fuente: Fotografía del autor



Eolian 3.
Fuente: Fotografía del autor

2.1.4. Observaciones

Todo el proceso, duró alrededor de tres meses, desde que el master fue llevado a la FAU en julio del 2012 hasta que se terminó el carenado en octubre. Cabe destacar que el proceso pudo ser más largo si el master no hubiera estado fabricado de antemano.

Debido a la envergadura del carenado fue necesaria la participación de las 10 personas que conformaron el equipo de diseño en el proceso de laminado, más la ayuda de los tres integrantes de Protean 1 que participaron en el Eolian 2, quienes aportaron con los conocimientos adquiridos en dicho proyecto. Además se necesitaban como mínimo seis personas para manipular el carenado de manera correcta y segura.

En cuanto a tecnología, se pudo realizar el laminado y su respectiva preparación con las herramientas disponibles en la facultad, a excepción de las dos bombas de vacío necesarias. Estas fueron compartidas con el equipo de Protean 1, quienes desarrollaban su vehículo en simultáneo.

Para el proyecto Eolian se destinó la sala G-16 del bloque G de la FAU, donde se realizaban los trabajos de fabricación y laminado, además se almacenaban los materiales, insumos y herramientas del proyecto. Dado que en esta sala se encontraban las bombas de vacío, el equipo Portean también utilizó esta dependencia.

Al terminar el laminado del carenado, del cual solo salió un ejemplar, el molde quedó en desuso. Como la sala G-16 fue entregada solo por el periodo en el que duró el proyecto, al término de este, el molde fue dejado a la intemperie, ya que por sus dimensiones no había otro lugar donde guardarlo. Luego de varios meses de estar al aire libre, los factores climatológicos dañaron el molde, y al final hubo que desecharlo.

2.2. Proyecto Protean

Como se ha mencionado anteriormente, el proyecto Protean es una instancia académica en la Facultad de Arquitectura y Urbanismo para generar y transmitir conocimiento, aplicándolo a la electromovilidad, llevada a cabo por un equipo multidisciplinario de estudiantes y académicos interesados en el tema, ya sea de la Universidad de Chile u otra casa de estudio.

“La misión del Proyecto Protean define principalmente cual es la labor o actividad que desarrolla en la Universidad, y el factor diferencial con el cual lo hace. El Proyecto académico Protean, se dedica a desarrollar y utilizar el modelo pedagógico investigación – acción, que junto con proyectos aplicados, configura una dinámica donde los académicos y estudiantes de la Universidad de Chile ponen a disposición todas sus capacidades humanas, conocimiento y experiencia, valorizando tanto las competencias blandas y duras en comunión a un objetivo claro y concreto. Además de desarrollar un carácter distintivo orientado a la amabilidad con el medio ambiente por parte de las prácticas de nuestras disciplinas, tomando muy en cuenta la sustentabilidad y sostenibilidad de nuestros procesos y usos de materiales” (Espinoza, 2015, pág. 6).

2.2.1. Historia

El proyecto Protean nace el 2011 en la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Chile, de la mano de un grupo de académicos y estudiantes de la carrera de Diseño Industrial. Este proyecto constó en el diseño y desarrollo de un triciclo híbrido cuyo funcionamiento se basó en energía electro solar y tracción humana, el cual compitió en la Carrera Solar Atacama 2012. El vehículo logró llamar la atención del público debido a la innovación aplicada en su desarrollo en materias de diseño, sustentabilidad y materiales, ya que logró salir de la tipología tradicional de estos vehículos. Se utilizaron fibras naturales reforzadas con resina, específicamente fibra de yute y resina epóxica para el carenado, en reemplazo de las tradicionales fibras de vidrio y carbono, además de experimentar con colihue para la fabricación de chasis y otros elementos estructurales, lo que funcionó de manera óptima.

Tras la carrera, el proyecto Protean toma fuerza y se instaura dentro de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo como un espacio académico de estudio y desarrollo de diversos temas relacionados a la actualidad del diseño, tales como electromovilidad, energías renovables, sustentabilidad en los materiales y procesos productivos, los cuales son aplicados en proyectos complejos tales como lo fue el vehículo Protean.

En el 2013 se lleva a cabo la carrera Desafío Cero, en la cual también competían vehículos eléctricos en un contexto urbano. Para esta carrera, el equipo Protean desarrolló el segundo prototipo híbrido completamente nuevo, llamado Protean 2, que funcionaba a tracción humana y electricidad, esta vez sin utilizar energía solar. Al igual que con el primer prototipo, se utilizó yute reforzado con resina para fabricar una carrocería autoportante, la cual contenía además un núcleo de madera balsa para darle estructura. La forma del auto se tomó del molde de la cabina de un planeador, para aprovechar sus propiedades aerodinámicas.

Para el año 2014, el equipo participó nuevamente en la Carrera Solar Atacama con el Protean 3. En esta ocasión no se diseñó un nuevo prototipo, sino que se reacondicionó el vehículo anterior para la posterior instalación de las celdas solares.

El último vehículo construido por el equipo Protean es el Protean Ackiu. Fue desarrollado y fabricado en 2015 y 2016 para participar en la Carrera Solar Atacama 2016. Se cambió la configuración de las ruedas, pasando de ser un triciclo a un vehículo tipo bicicleta (una rueda delantera y una trasera) con un sistema de ruedas laterales de apoyo. El chasis se construyó a partir de una plancha de acero de 2 mm de espesor, cortada con chorro de agua y plegada. Debido a la identidad del proyecto, el carenado fue nuevamente fabricado con compuesto de yute + epoxi, pero a partir de un proceso de fabricación obtenido como resultado este proyecto de título, el cual se explicará en detalle más adelante.



Protean 1.
Fuente: www.uchile.cl



Protean 2.
Fuente: www.bolido.com



Protean 3.
Fuente: www.fau.uchile.cl



Protean Ackiu.
Fuente: Fotografía del autor

2.2.2. Participación y responsabilidades en el Proyecto Protean

Al formar parte del equipo Portean se decidió realizar como principal tarea el diseño y fabricación del carenado para el Protean Ackiu, dada la experiencia obtenida en el área de materiales compuestos en el Proyecto Eolian. Para este objetivo se definieron los siguientes requerimientos de diseño:

Función de deflector aerodinámico: naturalmente, el carenado debe cumplir con su función principal que es crear una desviación del flujo de aire que permita mejorar las condiciones aerodinámicas del vehículo. También se puede redirigir este flujo con otros fines, como refrigeración de ciertos componentes del vehículo y del piloto. Además el carenado protege al piloto y a los elementos del auto de los elementos externos.

Carenado fabricado en compuesto de yute + epoxi: para seguir con la corriente ideológica que caracteriza al Proyecto Protean en cuanto a innovación, sustentabilidad y biomateriales, se decidió continuar con el uso de compuesto de fibra de yute reforzada con resina epóxica, ya que se ha validado su uso en las diferentes carreras en las que han participado los vehículos Protean.

Fabricado en la FAU: se decidió que el carenado se fabricaría en las dependencias de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo, utilizando sus instalaciones y la tecnología disponible, como el laboratorio CNC y el taller de herramientas, para constatar que en la facultad existe la capacidad productiva para el desarrollo y fabricación de un proyecto de este tipo.

Contenedor de la identidad Protean: El carenado del Protean Ackiu debe demostrar que es un producto salido de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Chile. Se debe evidenciar que este cuarto prototipo es el resultado del conocimiento traspasado desde el primer equipo Portean hasta llegar al actual, demostrando los valores propios del proyecto, tales como la sustentabilidad y el uso de materiales no convencionales, siendo pionero en innovación y diseño.

Como el proyecto Protean se caracteriza por ser una plataforma académica de generación y aplicación de conocimiento, se optó por realizar el proyecto de título

dentro de este marco. En un principio se decidió tomar el diseño del carenado en sí como proyecto título, bajo la línea de diseño de producto, el cual sería validado en la Carrera Solar Atacama 2016. Pero en el proceso, complementado con los conocimientos adquiridos en el proyecto Eolian, se encontró una oportunidad de investigación, en la cual se identifica un problema en el proceso de fabricación de pieles estructurales en FRP, en serie corta. El proyecto de título pasó a ser una investigación aplicada, teniendo como caso de aplicación el carenado del Protean Ackiu.

2.2.3. Proceso de fabricación de carenado: Protean 1

A continuación se analizará el proceso de fabricación del carenado del Protean 1, el cual sirvió como caso de estudio en la identificación de los factores críticos presentes en el proceso de laminado de compuestos a resolver con este proyecto.

Si bien la carrocería del Protean 2 y 3 se fabricó utilizando el mismo proceso de laminado, se tomará como ejemplo solamente el Protean 1, dada la similitud que tiene con el Protean Ackiu en su composición chasis – carenado.



Protean 1.
Fuente: www.fau.uchile.cl



Fabricación del master del Protean 1.
Fuente: Campos, 2013



Fabricación de los moldes del Protean 1.
Fuente: Campos, 2013



Laminado del carenado del Protean 1.
Fuente: Campos, 2013



Arreglo de superficie del carenado del Protean 1.
Fuente: Campos, 2013

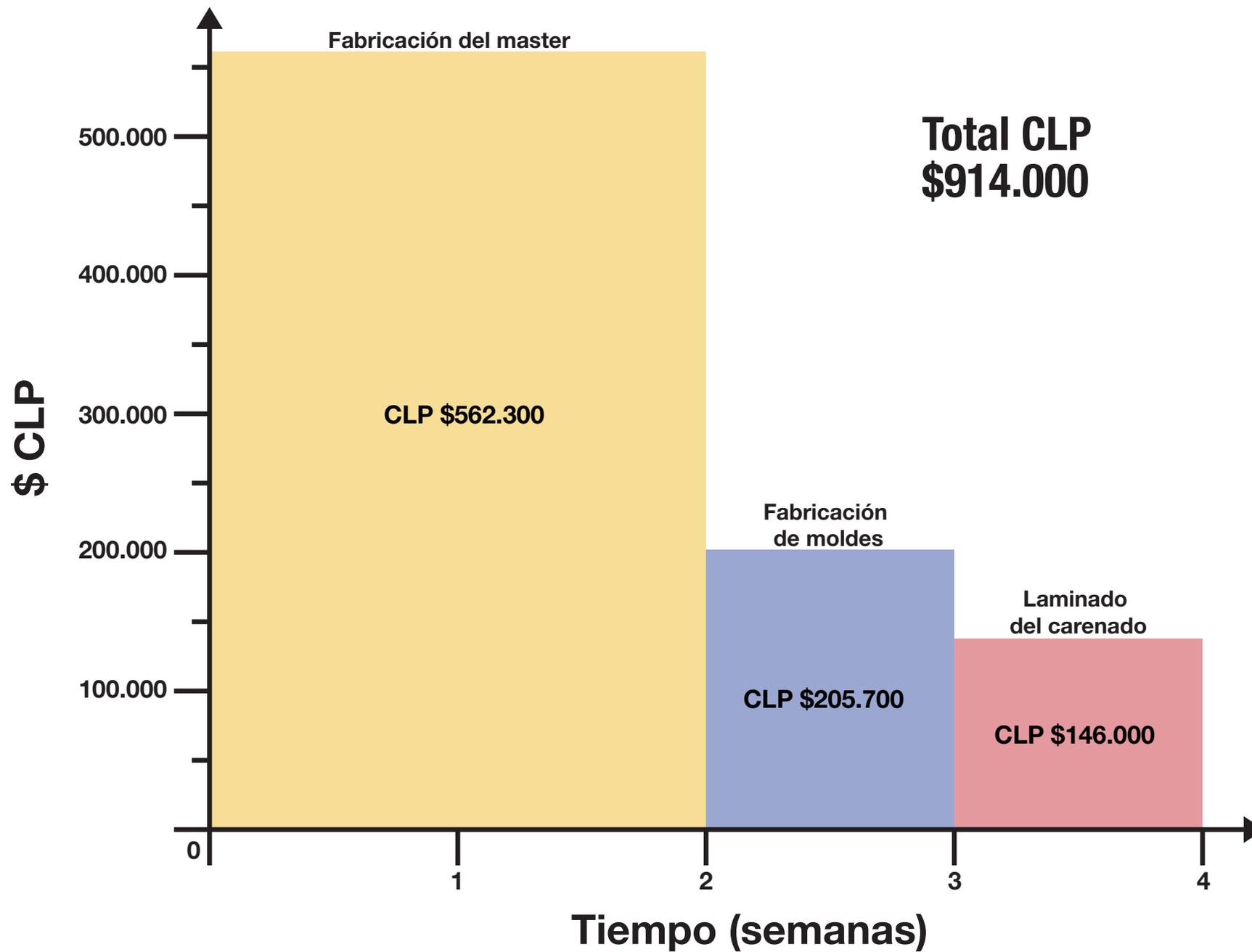


Gráfico de costo vs. tiempo de fabricación del carenado del Protean 1, según etapas.
Fuente: Elaboración propia

2.2.4. Observaciones

La carrera sirvió como etapa validadora de esta innovación en biomateriales compuestos, logrando terminarla sin que el carenado sufriera daños. Esto confirma que el compuesto de yute + epoxi es un material aplicable a contextos con factores exigentes, como estrés y altas temperaturas.

En total el proceso completo duró aproximadamente un mes, con cuatro personas trabajando en él.

El proceso de laminado fue el mismo que se utilizó en el Eolian 3, siguiendo los mismos pasos, a diferencia que en este caso sí se fabricó el master en la facultad, para obtener los moldes.

La tecnología utilizada fue similar a que se ocupó en el Eolian 3, utilizando herramientas del proyecto y de la facultad, además del uso de maquinaria del laboratorio CNC, específicamente la router para la fabricación del master. Pero como este superaba las dimensiones permitidas por la máquina, se trabajó en un proceso mixto de CAM y trabajo manual para obtener el volumen.

Al igual que el en el proyecto Eolian, el carenado se conformó por pieles estructurales extensas, que debían ser manipuladas por más de una persona.

El Proyecto Protean utilizó la sala G-16 en conjunto con el equipo Eolian para trabajos de laminado, además de la sala E-12, que ha funcionado como sala de operaciones y de trabajo desde el Protean 1 hasta la actualidad.

En este caso también se obtuvo solo una ejemplar del carenado, resultando en que los moldes fueran desechados tras la fabricación al no tener un lugar donde almacenarlos.

2.3. Conclusiones

Según las observaciones obtenidas a partir de las experiencias de laminado en los proyectos Eolian y Protean, se concluye lo siguiente. Cabe resaltar que lo concluido tiene validez en un contexto académico donde la participación en proyectos de la índole de la Carrera Solar Atacama, se realizan con recursos acotados y plazos definidos.

- ▶ El proceso de laminado en sí es una tarea relativamente rápida, dado que está sujeta al tiempo de trabajo de la resina que se utilice, que puede ser desde 20 minutos en algunos casos, hasta dos horas. Lo que más tiempo consume para obtener piezas en materiales compuestos son los sub-procesos de fabricación de master y moldes.
- ▶ Estos sub-procesos además tienden a absorber una gran cantidad de recursos, los cuales son bastante elevados si se considera que los moldes solo se utilizarán una vez.
- ▶ Todos los carenados fabricados bajo el marco de estos dos proyectos de electromovilidad han sido estructuras laminares continuas de grandes dimensiones. Esto resulta en la participación obligatoria de varias personas en su fabricación, manipulación y transporte. Además, si estas estructuras laminares llegaran a sufrir daños, se podría comprometer todo el carenado, lo que dificulta su reparación.
- ▶ Debido a las dimensiones de los carenados, las máquinas de fabricación CAM no son capaces de trabajar completamente en la fabricación de los volúmenes del master o directamente en los moldes, por lo que se deben descomponer los modelos digitales de estos en secciones para poder fabricarlas. Esto significa complementar el trabajo de las herramientas CNC con trabajo manual, resultando en un aumento de costo y tiempo del proceso, y una disminución de la precisión.

- ▶ Se genera una gran cantidad de basura en el proceso de laminado de materiales compuestos. El master y los moldes quedan en desuso inmediatamente luego de ser utilizados y su materialidad impide que sean reciclados. Además sus dimensiones hacen que se requiera un gran espacio para almacenarlos, y al no disponer de este, terminan en la basura.
- ▶ El uso del yute como fibra de refuerzo en materiales compuestos de matriz polimérica, ha respondido de manera óptima en las diferentes etapas validadoras a las que ha sido sometido. Es por eso que este material se puede seguir utilizando en el contexto de carenados de velomóviles, además de ser aplicable en otros rubros.

3. Proyecto

3.1. Requerimientos

Según las conclusiones obtenidas de los procesos de laminado realizados en los proyectos Eolian y Protean, se identifican los siguientes requerimientos, sobre las cuales se experimentará para cumplir el objetivo general del proyecto, desarrollar un proceso productivo de laminado de fibras reforzadas con polímeros en serie corta, que reduzca la complejidad del proceso actual, logrando resultados competitivos.

Modificar el sistema de conformado (moldes y matrices).

Reducir tiempos y costos de fabricación.

Reducir la cantidad de desechos del proceso.

Aplicar tecnologías CAD/CAM en el proceso.

Controlar las variables del diseño que permitan una fabricación precisa.

Reducir el tamaño de las piezas fabricadas, permitiendo que funcionen modularmente.

Mayor facilidad en la fabricación, manipulación, transporte y reparación.

Reducir el número de personas implicadas en la fabricación.

Capacidad trabajar con las dimensiones operativas de la maquinaria CAM.

Utilizar fibra de yute como fase secundaria (de refuerzo) en compuestos FRP.

Material económico y de fácil adquisición que funciona como sustituto competente de la fibra de vidrio.

Validado en la CSA 2012 y 2014 y Desafío Cero 2013.

Tomando en cuenta la estructura laminar volumétrica, resultante del proceso de laminado de FRP, se decidió buscar referentes de técnicas y procesos de fabricación en donde los resultados tuvieran las mismas características.



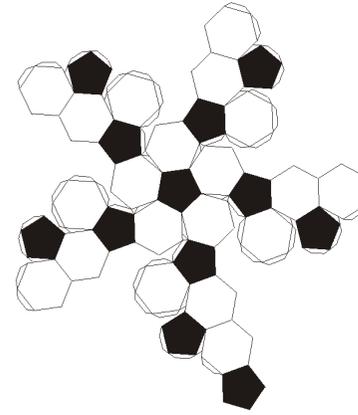
Papiroflexia.
Fuente: www.papiroflexiamania.com



Pantalla de lámpara de papel plegado.
Fuente: www.decorahogar.es



Silla a partir de plegado de chapa metálica.
Fuente: www.archiexpo.com



www.korthalsaltes.com

Desarrollo de balón de fútbol, icosaedro truncado.
Fuente: www.korthalsaltes.com

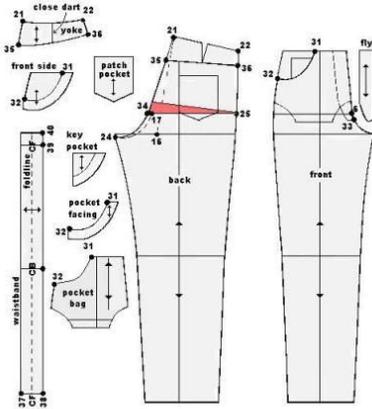


Balón de fútbol, icosaedro truncado.
Fuente: culturacientifica.com

Estos procesos tienen en común la característica de formar distintos tipos de volúmenes a partir de elementos laminares unidos entre sí, ya sea por pliegues o por un sistema de unión. Para lograr este resultado, primero se debe diseñar el volumen en su totalidad, para luego descomponerlo en sus componentes, los cuales se trabajan sobre un material en formato de lámina. Finalmente, se vuelven a componer los elementos laminares para formar el volumen.

En los casos de la papiroflexia y el plegado de chapa metálica, el volumen se forma por pliegues, entregando nervaduras que dan estructura al volumen, resultando en una estructura autoportante.

En el caso de la confección textil, para indumentaria o el exterior balones deportivos, el volumen se construye uniendo los elementos laminares, que usualmente son independientes el uno del otro. Como el material textil no es tan rígido como la chapa metálica, el cartón o incluso el papel, al conformar el volumen, este no mantiene su forma como en los ejemplos anteriores. La estructura en estos casos la da un cuerpo independiente al volumen, como la cámara inflada del balón o el usuario de una prenda.



Plantillas de pantalones
Fuente: picmia.com



Blue jeans
Fuente: riverisland.scene7.com

Utilizando como referente estas técnicas de conformación de volúmenes, se decidió tomar el concepto y aplicarlo al proceso de laminado de materiales compuestos en FRP, para obtener objetos tridimensionales sin necesidad de fabricar un molde para cada pieza. Como unas de las características más importantes de los materiales compuestos son su rigidez y resistencia, sin la necesidad de un elemento externo que le dé estructura, se tomó la decisión de utilizar una lámina de compuesto rígido como material para plegar y conformar un volumen, siguiendo la corriente de la papiroflexia y el plegado de chapa metálica.

Pero debido a las características de las FRP, si estos se pliegan podrían romperse las fibras y reducir drásticamente las propiedades del compuesto. Es por eso que además, se debe realizar un refuerzo en el pliegue para garantizar que la zona no se debilite.

En resumen, se desarrollará una técnica de conformación de volúmenes a partir del plegado de una lámina prefabricada en materiales compuestos de FRP, que luego se reforzará para garantizar estructuralidad.

Como resultado del proceso, será posible obtener un universo morfológico extenso, compuesto por objetos volumétricos conformados a base de caras poligonales. Esto porque si bien la lámina a plegar es deformable hasta cierto punto, esta deformación no admite crear superficies de doble curvatura. Esto no quita que se pueda dar un aspecto similar, tomando como ejemplo un balón de fútbol tradicional de 32 cascos, que en estricto rigor no es esférico sino un icosaedro truncado.

Desde el año 2015, se ha hecho popular una tendencia retro de diseño que consta en la representación de objetos, ya sea en 2D o 3D, teselados con polígonos definidos, inspirándose en elementos como el origami y los modelos 3D poligonales de los 90's. Este concepto se denomina low poly, haciendo referencia al relativo bajo número de polígonos utilizados, ya que mientras mayor sea el número de polígonos, más definida será la superficie, siendo esto lo opuesto a lo que se quiere llegar. Es por eso que el universo morfológico que entrega la técnica desarrollada en este proyecto, puede formar parte de esta tendencia.



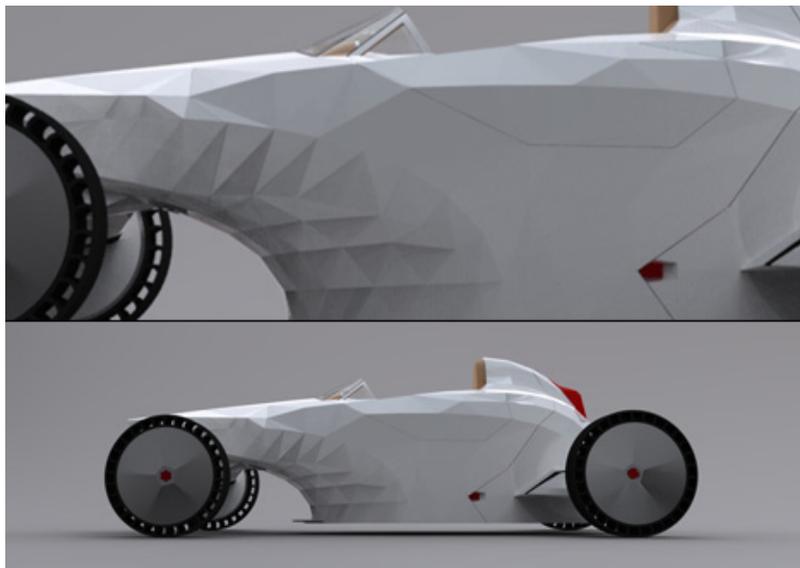
Escultura Low Poly
Fuente: www.sessions.edu



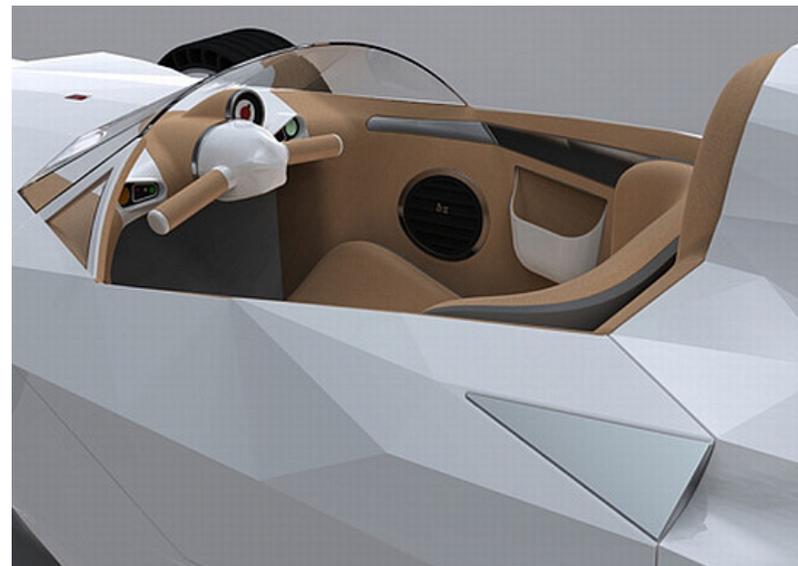
Escultura Low Poly
Fuente: tporcher-design.blogspot.com



Ilustración Low Poly de Jack Nicholson
Fuente: www.sessions.edu



Low Poly Hor Rod
Fuente: www.norfolkstreetcruisers.co.uk



Low Poly Hor Rod
Fuente: www.norfolkstreetcruisers.co.uk

En cuanto a materialidad, se decidió utilizar el compuesto de fibra de yute reforzado con resina epóxica, ya que es el material definido por el equipo Protean para la fabricación del carenado del vehículo Protean Ackiu. Además, cumple con las ventajas de ser más económico que las fibras de refuerzo tradicionales, como la fibra de vidrio y de carbono, y su manipulación no presenta riesgos nocivos a la salud, como la irritación cutánea y pulmonar que las fibras tradicionales pueden producir.



COCOON - Vollendete Geborgenheit

Ataud de compuesto de yute Uono Cocoon
Fuente: www.slow-wear.de



Carcasa de parlante de compuesto de yute
Fuente: jute-lab.org

Con la obtención de estos requerimientos fue posible comenzar la etapa de experimentación y prototipado, para identificar los puntos críticos que pueda presentar el proyecto.

3.2. Experimentación

3.2.1. Metodología

Para esta etapa se utilizó la metodología de prototipado del libro Diseño y Desarrollo de Productos (Ulrich & Eppinger, 2013), donde los autores tienen su propia definición del concepto prototipo:

“Definimos prototipo como “una aproximación al producto en una o más dimensiones de interés”. Con esta definición, cualquier entidad que exhiba al menos un aspecto del producto que es de interés para el equipo de desarrollo puede considerarse como prototipo. Esta definición se debía del uso estándar en que incluye formas tan diversas de prototipo; por ejemplo, bosquejos de conceptos, modelos matemáticos, simulaciones, componentes de prueba y versiones completamente funcionales previas a la producción de un producto. Construir prototipos es el proceso de desarrollar esa aproximación al producto” (Ulrich & Eppinger, 2013, pág. 286).

Es necesario aclarar que en esta etapa de la investigación, el resultado no es un producto sino la conformación de un proceso, pero se aplica la misma metodología, realizando prototipos para refinar los distintos aspectos que lo sustentarán.

Según los autores, los prototipos se pueden catalogar por su nivel de tangibilidad y su nivel de especificación.

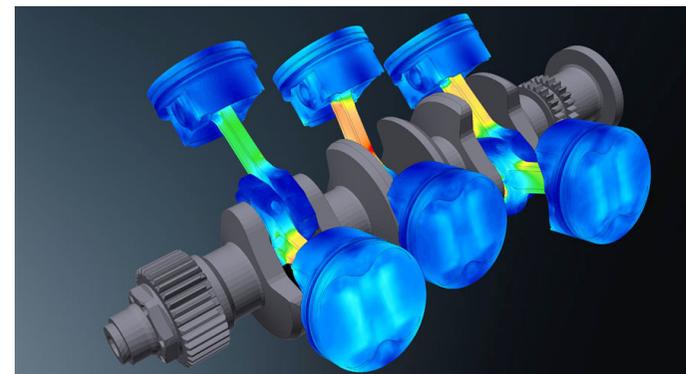
Tangibilidad: prototipo físico o analítico

Físico: los prototipos físicos son elementos tangibles que permiten explorar forma y funciones de un objeto, pieza o mecanismo. Estos prototipos permiten identificar fenómenos físicos que pueden pasar desapercibidos en un modelo virtual.



Prototipos físicos
Fuente: cloudfront.net

Analítico: los prototipos analíticos son representaciones virtuales que sirven para analizar ciertas características del proyecto sin necesidad de fabricar un prototipo tangible. Este tipo de prototipos suele ser más flexible que los físicos, ya que se pueden modificar ciertos parámetros y realizar las pruebas sin la necesidad de fabricar o modelar nuevamente el prototipo.



Prototipo analítico
Fuente: engineering.com

Especificación: prototipo enfocado – integral

Enfocado: los prototipos enfocados suelen utilizarse para probar ciertas características específicas de un producto, y así identificar fácil e aisladamente los puntos críticos de un atributo, sin la necesidad de construir un prototipo del producto completo.

Integral: un prototipo integral sirve para comprender el funcionamiento de todos, o una gran mayoría, de los atributos y características de un producto. Sirve para verificar el funcionamiento en conjunto de todas las partes y probarlas en los contextos en que se va a usar.



Prototipo enfocado
Fuente: www.ytimg.com



Prototipo integral
Fuente: atlantic-carpentry.com

3.2.2. Prototipado

El propósito de la etapa de prototipado es conocer la mejor forma de llevar a cabo el proceso productivo desarrollado en este proyecto de título. Cada prueba o prototipo busca identificar un aspecto de la técnica, para finalizar con un prototipo integral que valide este proceso.

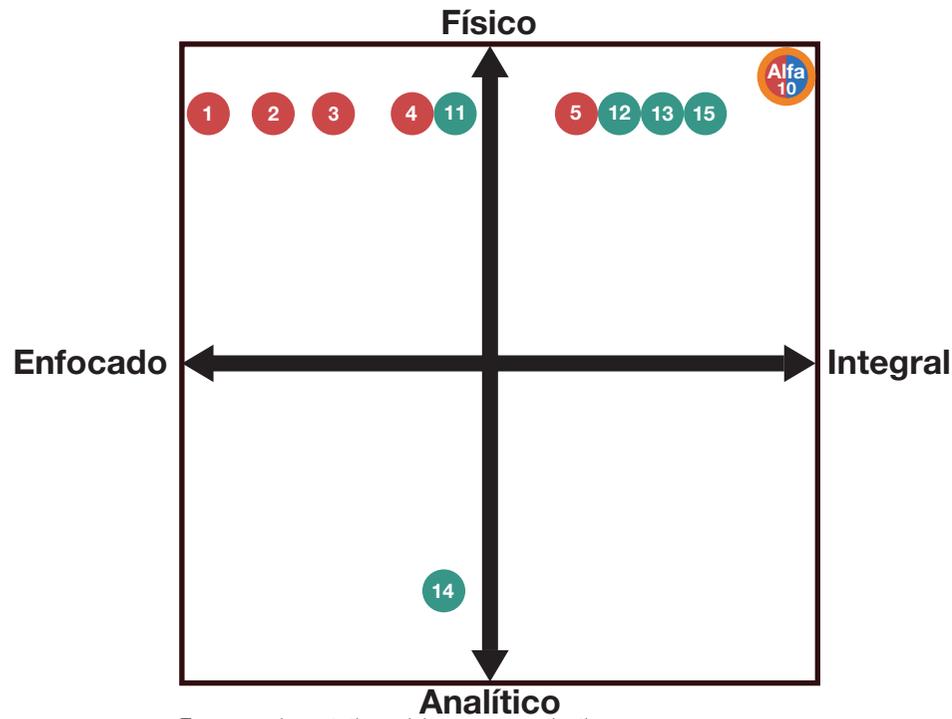
Un hito importante dentro de la investigación fue la construcción del carenado del Protean Ackiu, ya que al estar trabajando bajo el marco de este proyecto académico, lo desarrollado en esta investigación debía ser aplicado al vehículo. El carenado actuó como prototipo físico integral del proceso productivo, utilizando la Carrera Solar Atacama como etapa de validación, realizada desde el 21 al 27 de abril del 2016.

Dado que este proyecto de título comenzó en marzo del 2016, solo se contó con un mes y 21 días para realizar la investigación y prototipado de la técnica, para pasar posteriormente al diseño y fabricación del carenado, lo que a su vez también contó con una etapa de prototipado enfocada al producto. Luego de la CSA 2016, se analizó el funcionamiento del carenado, obteniendo nueva información que permitió continuar con la etapa de prototipado, para refinar aún más el proceso productivo a desarrollar.

Prototipos

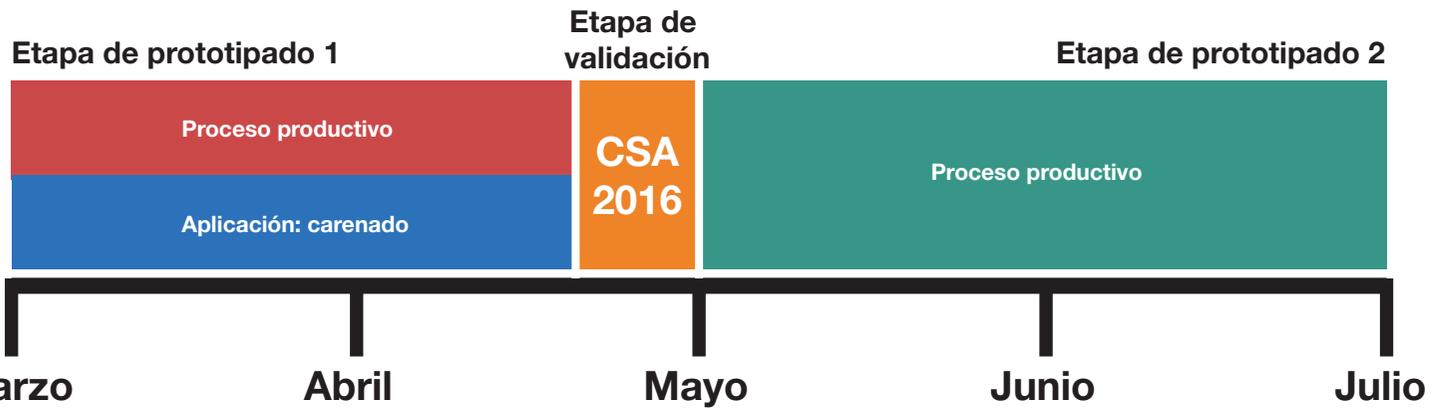
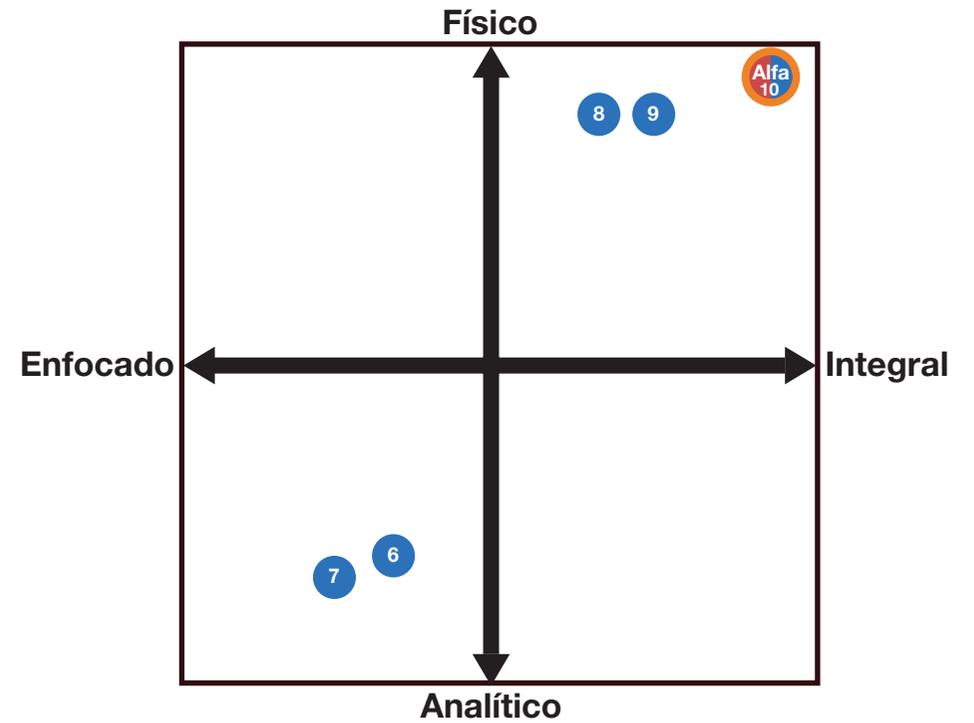
- 1 - Tipo de laminado
- 2 - Método de corte
- 3 - Pruebas de plegado
- 4 - Refuerzo de la arista de pliegue
- 5 - Volumen plegado de compuesto
- 6 - Prototipo virtual del carenado
- 7 - Análisis de flujo aerodinámico
- 8 - Modelo del carenado en papel 1:5
- 9 - Maqueta del carenado en cartón 1:1
- Alfa (10) - Carenado del Protean Ackiu
- 11 - Refuerzo interno
- 12 - Refuerzo interno en volumen
- 13 - Refuerzo interno en volumen 2
- 14 - Herramienta digital paramétrica para fabricación de plantillas de corte y posicionador de volumen
- 15 - Refuerzo interno del volumen 3

Protitipos del proceso productivo



Esquema de prototipos del proceso productivo
Fuente: Elaboración propia

Protitipos del carenado del Portean Ackiu



Línea de tiempo del proceso de prototipado
Fuente: Elaboración propia

3.2.2.1. Prototipo 1: Tipo de laminado

Físico - enfocado

Descripción:

Con el primer prototipo se busca identificar las variables que permitan obtener el formato laminar, que servirá para realizar el plegado en la conformación de volúmenes.

Propósitos a evaluar:

Seleccionar el tipo de laminado para la obtención del formato laminar.

Variables:

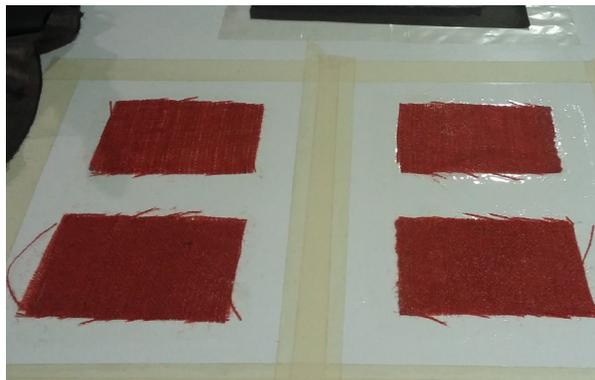
Número de capas de fibra de yute

Laminado manual con presión atmosférica y al vacío

Constantes:

Fibra de yute de 10 onzas, 150 mm x 100 mm

Resina epóxica Mepox 1685



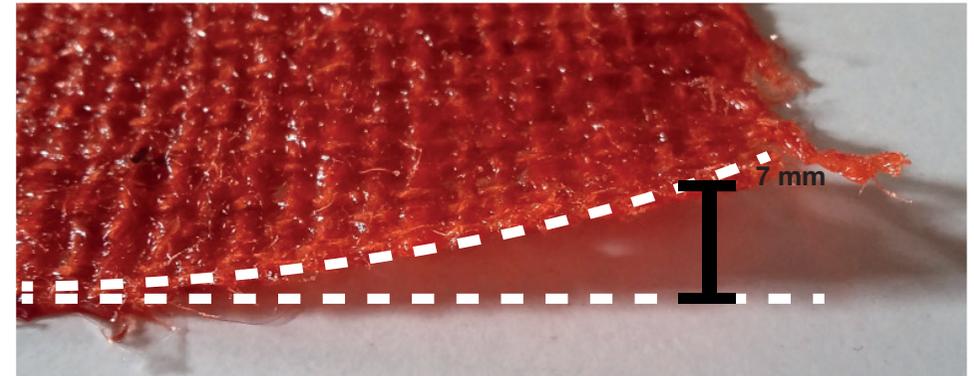
Laminado de probetas con presión atmosférica y al vacío.
Fuente: Fotografía del autor

1,2 mm	1,4 mm	1,1 mm	15 gr	1 capa sin vacío
1,7 mm	1,9 mm	2,0 mm	28 gr	2 capas sin vacío
0,8 mm	0,8 mm	0,8 mm	11 gr	1 capa con vacío
1,5 mm	1,6 mm	1,5 mm	21 gr	2 capas con vacío

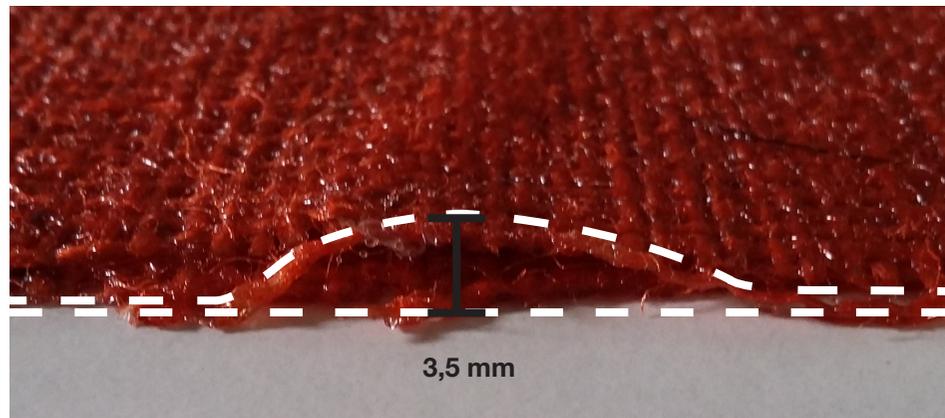
Tabla de propiedades de los resultados del laminado.
Fuente: Elaboración propia



Probeta laminada al vacío, 2 capas de fibra de yute + resina epóxica.
Fuente: Fotografía del autor



Deformación del laminado a presión atmosférica.
Fuente: Elaboración propia



Separación de las capas del laminado a presión atmosférica.
Fuente: Elaboración propia

Resultados:

La compresión del vacío aplanar las arrugas y separaciones que pueda presentar la tela.

El espesor de las probetas laminadas al vacío es más regular que las laminadas con presión atmosférica.

Las probetas laminadas al vacío presentan una mejor relación fibra/resina, ya que el proceso absorbe el exceso de resina en el compuesto, lo que se traduce en menos peso del laminado.

Se realizarán pruebas de corte y plegado del compuesto de 1 y 2 capas de fibra laminadas al vacío.

3.2.2.2. Prototipo 2: Método de corte

Físico – enfocado

Descripción:

Ya teniendo las probetas de compuesto laminado al vacío con 1 y 2 capas, se procede a identificar el mejor método de corte, pensando en la fabricación de objetos volumétricos plegados. Al igual que en la prueba anterior, se busca identificar más factores que permitan definir el número de capas para la fabricación del formato laminar.

Propósitos a evaluar:

Seleccionar el número de capas para la obtención del formato laminar.

Identificar el mejor método de corte del compuesto.

Variables:

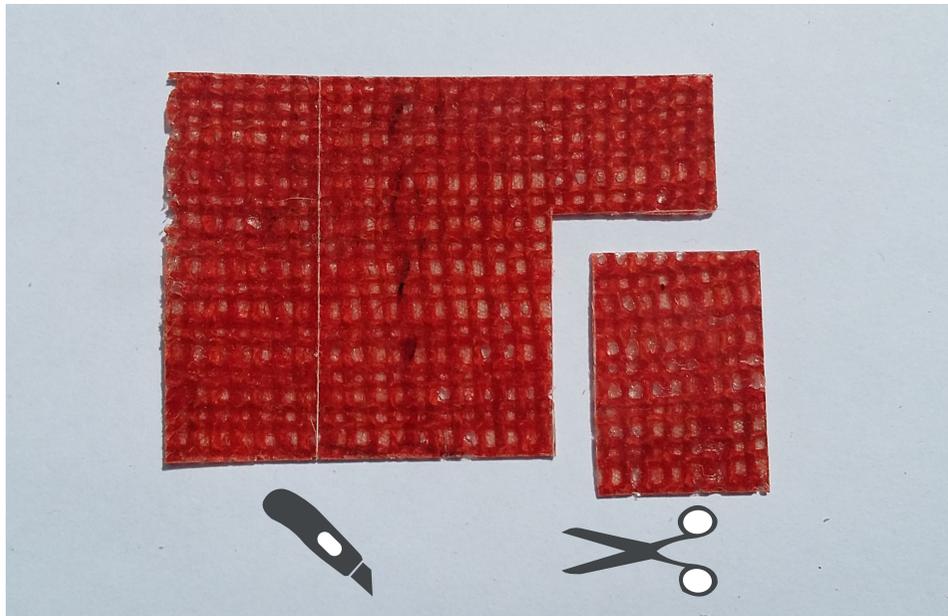
Número de capas del compuesto (1 y 2)

Método de corte: Manual: cuchillo cartonero y tijera
CAM: corte láser

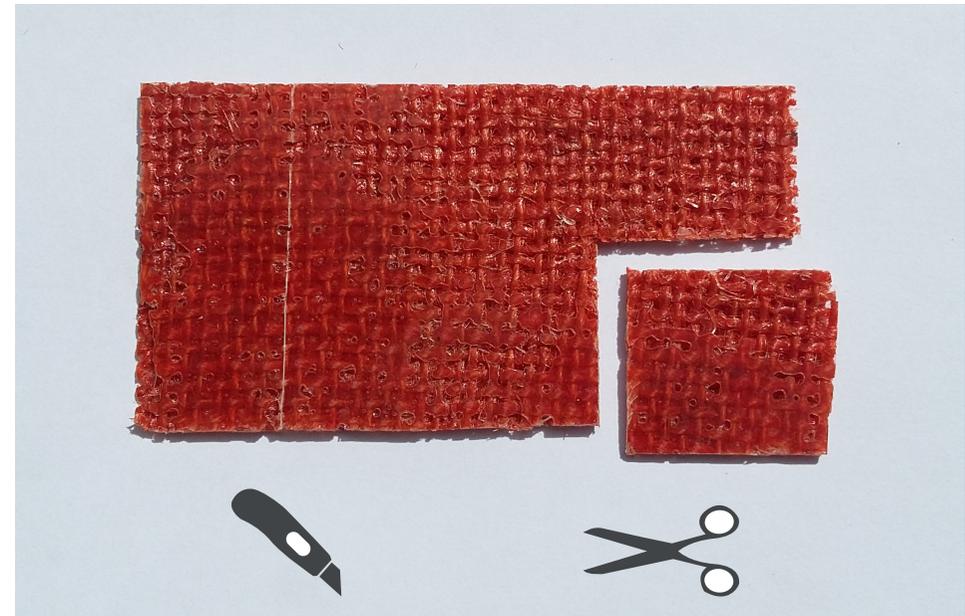
Constantes:

Fibra de yute de 10 onzas

Resina epóxica Mepox 1685



Corte manual en compuesto de 1 capa.
Fuente: Elaboración propia



Corte manual en compuesto de 2 capas.
Fuente: Elaboración propia



Corte láser en compuesto de 2 capas.
Fuente: Fotografía del autor

Prueba	Potencia %	Velocidad %	PPI %	Resultado
1	98	5,4	800	Corta 60%
2	90	5,4	800	Corta 50%
3	98	4	800	Corta 80%
4	98	3,5	800	Corta 90%
5	98	3	800	Corta 100%

Óptimo para
semicorte

Óptimo para
corte

Tabla de parámetros de corte láser en compuesto de 2 capas.
Fuente: Elaboración propia

Resultados:

El cuchillo cartonero no es capaz de cortar completamente ninguna de las dos probetas, pero permite hacer semi cortes para facilitar el plegado.

La tijera corta fácilmente el compuesto de 1 capa, y la precisión depende de la destreza del operador. El compuesto de 2 capas puede cortarse, pero aumenta la dificultad.

El corte láser permite cortar ambos compuestos de manera precisa y rápida, pero se obtiene mayor control en el compuesto de 2 capas, logrando realizar semi cortes para el plegado.

Por una medida de seguridad del laboratorio CNC de la FAU, no se permite cortar compuestos laminados con polímeros, debido a los gases emanados al quemar el material, por lo que esta opción queda descartada.

El corte con tijera en el compuesto de 1 capa fue el que entregó el mejor resultado después del corte láser, por lo que fue escogido como el método de corte a utilizar. Esto condiciona el uso de compuesto de 1 capa de fibra de yute.

3.2.2.3. Prototipo 3: Pruebas de plegado

Físico – enfocado

Descripción:

En esta prueba se busca documentar el comportamiento del formato laminar de compuesto de 1 capa al momento de plegarlo, y también identificar los problemas que puedan surgir durante este proceso.

Propósitos a evaluar:

Identificar el método de plegado del compuesto laminado con 1 capa de fibra de yute.

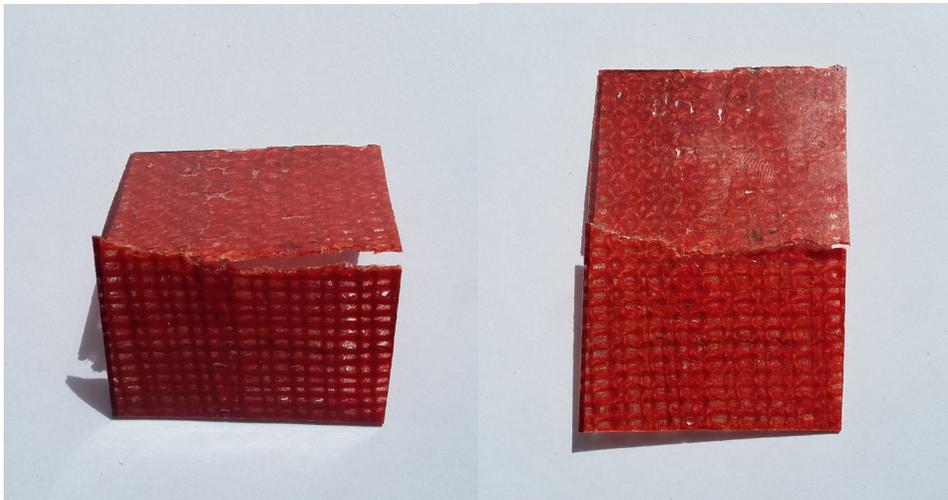
Variables:

Plegado sin guía

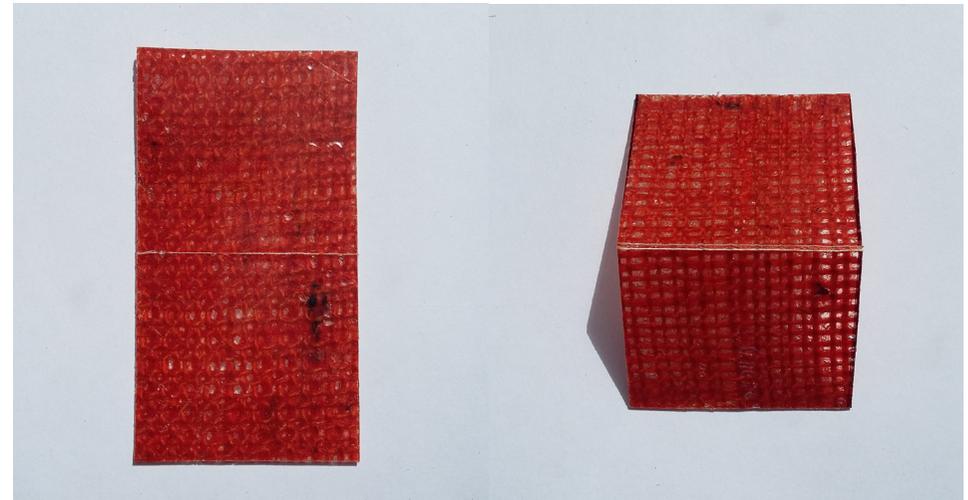
Plegado con semi corte

Constantes:

Compuesto de 1 capa de yute + resina epóxica laminado al vacío.



Plegado de compuesto de 1 capa sin guía.
Fuente: Fotografía del autor



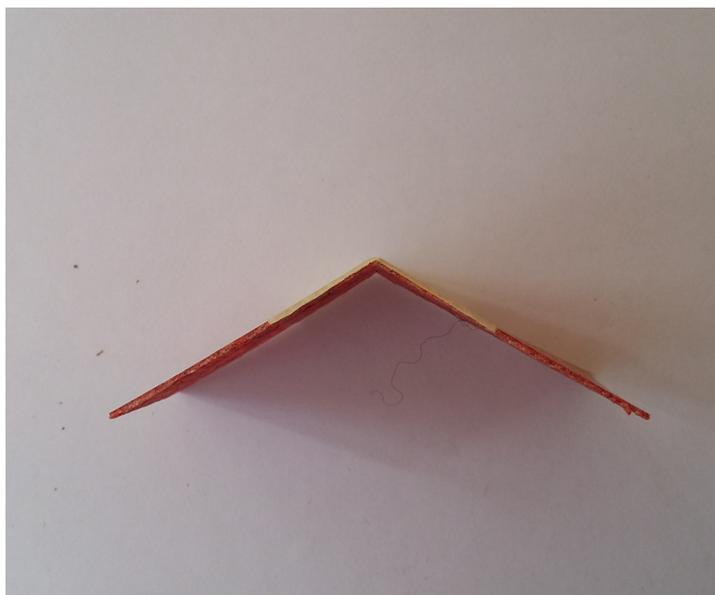
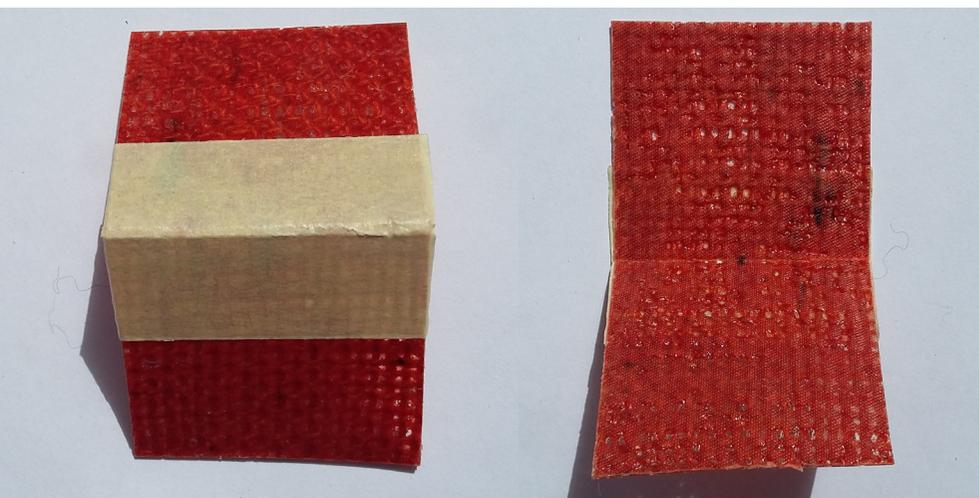
Plegado de compuesto de 1 capa con semicorte.
Fuente: Fotografía del autor



Rotura en plegado en compuesto de 1 capa.
Fuente: Fotografía del autor



Refuerzo en arista de pliegue en compuesto de 1 capa.
Fuente: Fotografía del autor



Plegado de compuesto de 1 capa.
Fuente: Fotografía del autor

Resultados:

Al plegar el compuesto sin ningún tratamiento, se genera una grieta irregular, dándole un aspecto desprolijo. Por lo tanto este método queda descartado.

Al plegar el compuesto con un semi corte previo, se obtiene una arista uniforme que entrega un resultado controlado, por lo que se considera la mejor opción para realizar el pliegue.

En algunos casos, al realizar el pliegue se rompe el compuesto en las dos secciones separadas por este. Para solucionar este problema se decide colocar cinta adhesiva de enmascarar sobre el semi corte antes de plegar el compuesto, para evitar la ruptura y mantener todas las caras del volumen en su lugar.

En esta parte del proceso, se toma en cuenta que las fibras del compuesto se rompen al plegarse, resultando en un objeto conformado por caras que funcionan estructuralmente de manera independiente unidas por una arista, perdiendo su estructura laminar continua, a diferencia de los proceso de laminado tradicionales donde una sola lámina conforma todo el volumen. Es por eso que el paso siguiente es realizar pruebas de refuerzo de estas aristas, para lograr nervaduras que actúen a modo de esqueleto del objeto.

3.2.2.4. Prototipo 4: Refuerzo de la arista de pliegue

Físico – enfocado

Descripción:

Con el prototipo 4 se realizaron las pruebas de refuerzo en la zona del pliegue. Para esto se utilizó la misma técnica que se utiliza en el laminado de compuestos de FRP, donde se posicionan fibras en formato de hilo o mecha junto a un cúmulo de resina con carga (para espesar) a lo largo de los cantos a laminar, para darle mayor estructura a la zona.

Para estas pruebas se utilizó pegamento epóxico de secado rápido (5 min.) en vez de resina epóxica, para reducir el tiempo de obtención de las probetas. No se aplicó carga, porque el pegamento al tener una consistencia más viscosa que la resina, se mantiene en el lugar y no se drena de la probeta. Además, el factor del corto tiempo de trabajo del adhesivo, ayuda a que la fibra de refuerzo no se mueva del canto y perjudique el desarrollo de la prueba.

Como fibra de refuerzo, se decidió no cambiar de material y seguir utilizando yute. En este caso, cabo de yute torcido de 3 mm de diámetro.

Propósitos a evaluar:

Probar el método de refuerzo de cantos del laminado en FRP, con probetas de láminas de compuesto yute + epoxi plegadas en distintos ángulos.

Probar si este método logra reforzar la arista del pliegue y mantener las dos caras de la probeta unidas, manteniendo el ángulo dado a cada una.

Variables:

Ángulos de las probetas: 90°, 60°, 45°, 30°, 15°

Constantes:

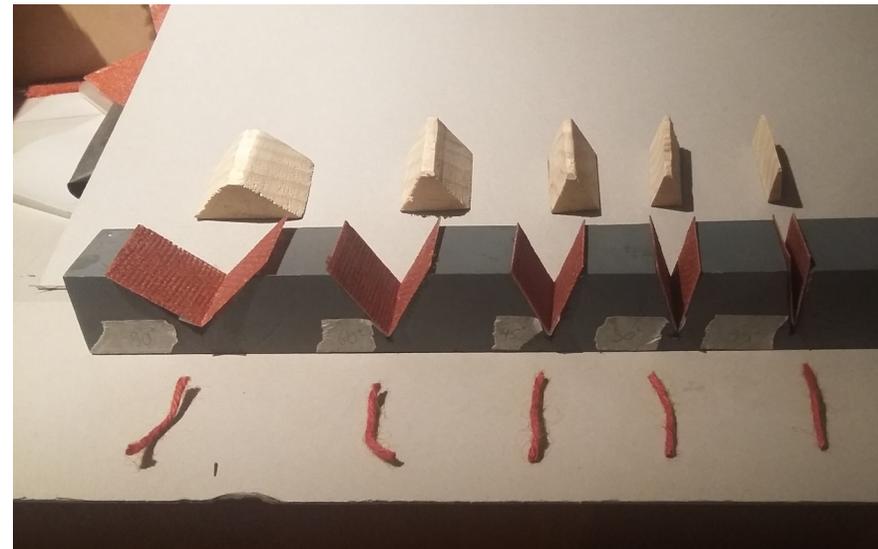
Compuesto de 1 capa de yute + resina epóxica laminado al vacío.

Corte con tijera y semi corte con cartonero.

Plegado en el semi corte.

Refuerzo de la arista con cinta adhesiva antes de las pruebas.

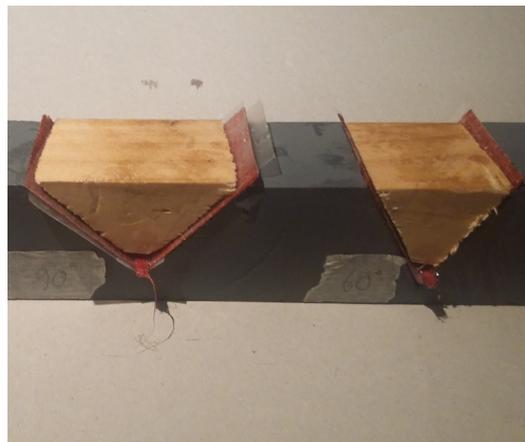
Refuerzo de la arista de pliegue con cabo de yute de 3mm de diámetro y pegamento epóxico Mepox Rápido.



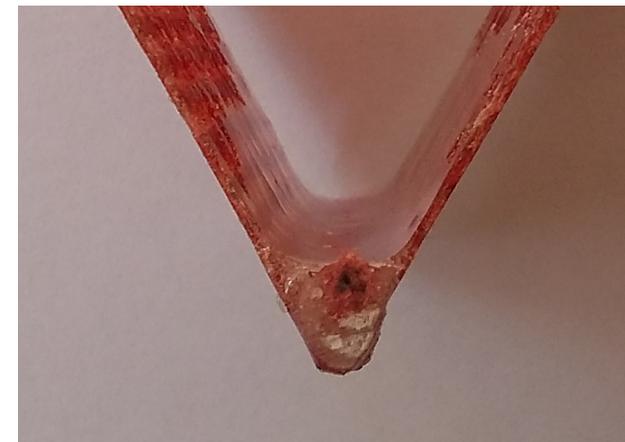
Matriz de ángulos para refuerzo de arista de pliegue.
Fuente: Fotografía del autor



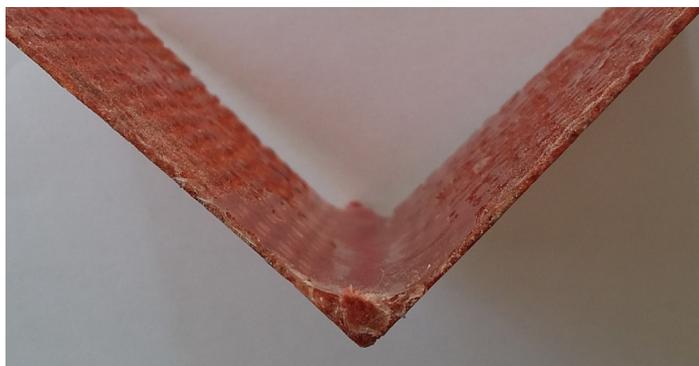
Matriz de ángulos para refuerzo de arista de pliegue.
Fuente: Fotografía del autor



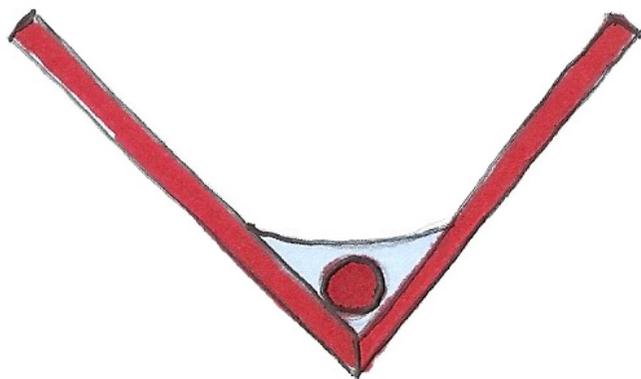
Refuerzo de arista de pliegue.
Fuente: Fotografía del autor



Refuerzo de arista de pliegue, canto de resina con cabo de yute.
Fuente: Fotografía del autor



Refuerzo de arista de pliegue, canto de resina con cabo de yute.
Fuente: Fotografía del autor



Esquema de refuerzo de arista de pliegue en corte
Fuente: Elaboración propia

Resultados:

Se logra crear una nervadura resistente que mantiene unidas las dos caras de la probeta. Esta nervadura pasa de ser la zona más débil de la probeta, a la más resistente, ya que el cabo de yute resiste las fuerzas perpendiculares a la arista de pliegue para evitar flexiones, y el cúmulo de pegamento epóxico mantiene las dos caras unidas y con el ángulo dado.

Como el pegamento epóxico y la matriz polimérica de la probeta son del mismo material, existe una compatibilidad óptima entre los dos para obtener un buen vínculo molecular.

La probeta tiene una de sus caras con textura rugosa por el resultado del laminado al vacío, por lo que se realiza el refuerzo en este lado. Esto permite que el pegamento genere retenciones físicas que permitan una mejor adhesión.

3.2.2.5. Prototipo 5: Volumen plegado de compuesto

Físico – integral

Descripción:

Ya identificando el formato laminar de compuesto y los métodos de corte, plegado y refuerzo, se prosigue a fabricar un prototipo volumétrico que integre estos factores para formar un proceso.

El prototipo se puede catalogar como un trapezoide volumétrico, donde ninguna de sus caras ni aristas son paralelas entre sí. Como se deben reforzar las aristas de pliegue y de unión de caras, se dejó una cara abierta para poder acceder a ellas.

Propósitos a evaluar:

Fabricar un volumen con la técnica de plegado de compuestos, utilizando las consideraciones obtenidas con el proceso de prototipado.

Variables:

Ángulos a reforzar: $69,58^\circ$, $99,91^\circ$, $113,35^\circ$, $77,16^\circ$, $69,58^\circ$, $16,38^\circ$, $94,38^\circ$, $107,78^\circ$, $107,95^\circ$

Constantes:

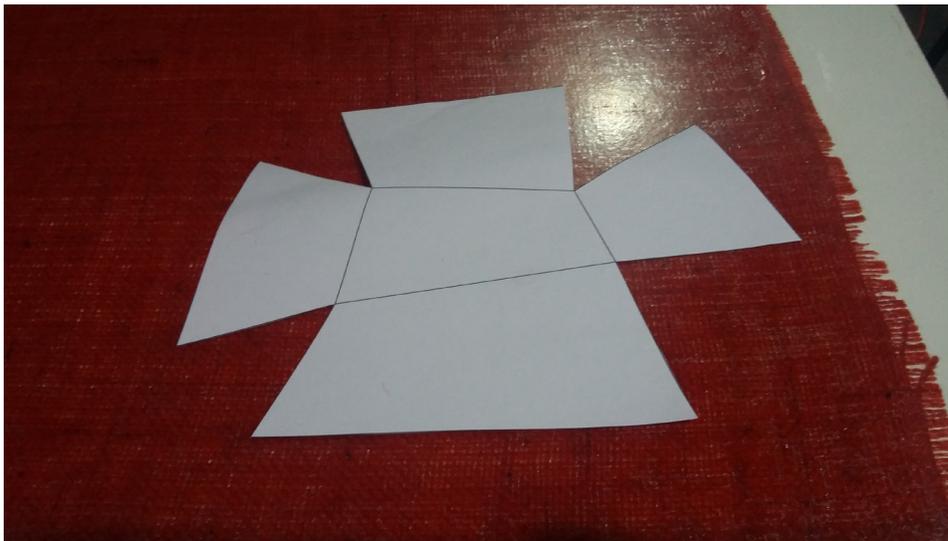
Compuesto de 1 capa de yute + resina epóxica laminado al vacío.

Corte con tijera y semi corte con cartonero.

Plegado en el semi corte.

Refuerzo de la arista con cinta adhesiva antes de las pruebas.

Refuerzo de la arista de pliegue con cabo de yute de 3mm de diámetro y pegamento epóxico Mepox Rápido.



Plantilla de corte de probeta.
Fuente: Fotografía del autor



Geometría desarrollada de la probeta. Corte de compuesto de 1 capa
Fuente: Fotografía del autor



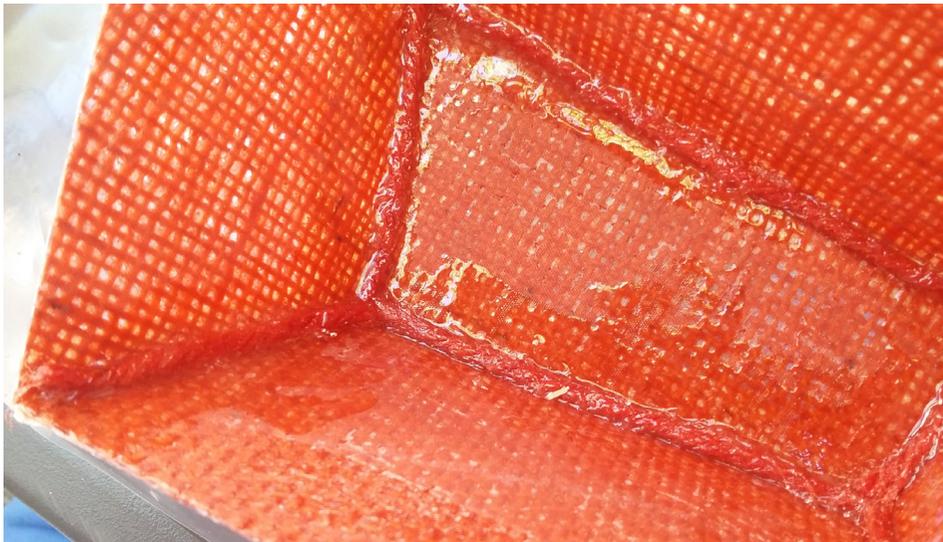
Plegado de compuesto, para conformar el volumen de la probeta.
Fuente: Fotografía del autor



Refuerzo y unión de cantos con cinta adhesiva. Vista externa.
Fuente: Fotografía del autor



Refuerzo y unión de cantos con cinta adhesiva. Vista interna.
Fuente: Fotografía del autor



Probeta volumétrica de compuesto de 1 capa, plegada y reforzada con
cabo de yute y pegamento epoxi.
Fuente: Fotografía del autor

Resultados:

El refuerzo del cabo de yute con el pegamento epóxico forma una estructura interna que sirve como bastidor para las caras de compuesto.

El prototipo se comporta como una estructura autoportante.

El siguiente prototipo a construir para probar el proceso de conformado, será con los paneles que componen el carenado del Protean Ackiu.


32 gr

3.2.2.6. Prototipo 6: Prototipo virtual del carenado

Análítico

Descripción:

Habiendo logrado la fabricación de un volumen con el prototipo 5, utilizando las variables identificadas hasta el momento, se inició el proceso de diseño y fabricación del carenado del Protean Ackiu, para la aplicación del proceso.

Propósitos a evaluar:

Realizar exploraciones formales del carenado digitalmente.

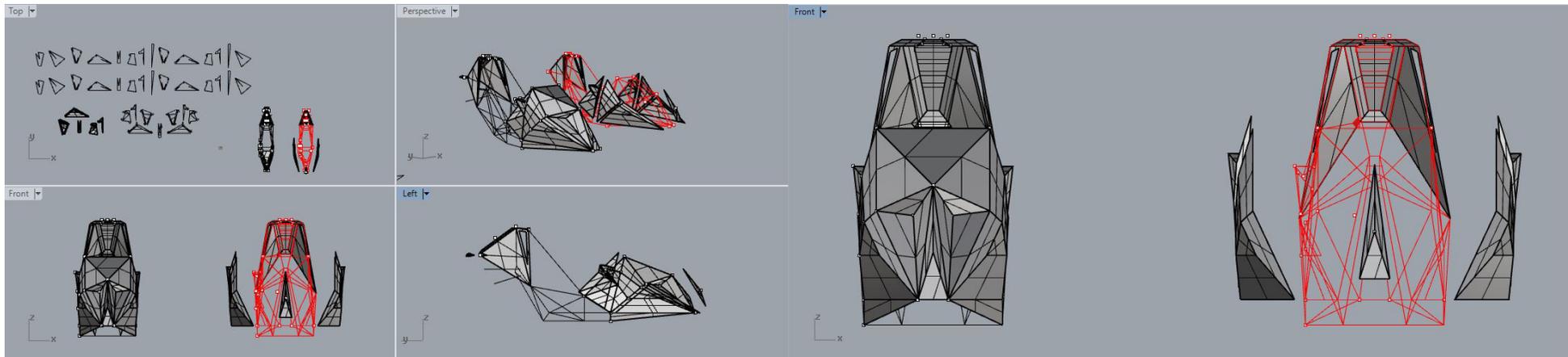
Variables:

Geometría del carenado.

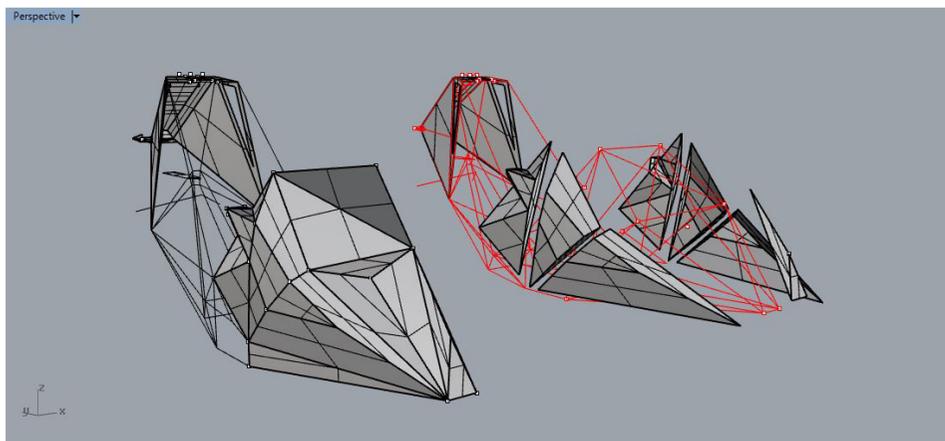
Constantes:

Volumen conformado por caras poligonales.

Chasis del Protean Ackiu.



Prototipo virtual del carenado del Protean Ackiu.
Fuente: Elaboración propia



Prototipo virtual del carenado del Protean Ackiu.
Fuente: Elaboración propia

Resultados:

Con la propuesta del carenado modelada, es posible realizar pruebas digitales que entreguen datos sobre su funcionamiento.



Render en contexto del Protean Ackiu.
Fuente: Elaboración propia

3.2.2.7. Prototipo 7: Análisis de flujo aerodinámico

Análítico – enfocado

Descripción:

Este prototipo virtual permite conocer varios factores del funcionamiento del carenado antes de fabricarlo, lo que puede repercutir en un cambio morfológico. Además, se puede estudiar el comportamiento de la geometría poligonal del carenado, como deflector aerodinámico.

Propósitos a evaluar:

Conocer el comportamiento del carenado en una simulación de túnel de viento.

Obtener el coeficiente de resistencia aerodinámica del carenado (C_x), para poder calcular la potencia necesaria para desplazar al vehículo a 40 km/h en un medio de 1,15 kg/m³ de densidad.

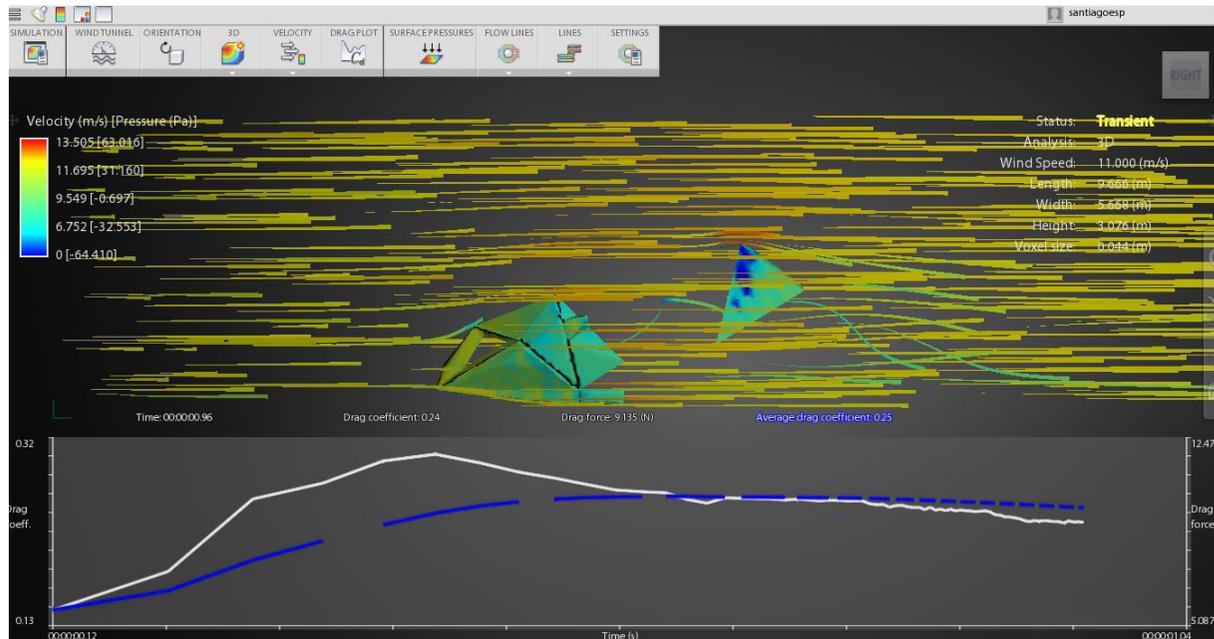
Variables:

Geometría del carenado: área frontal: 0,55 m²

Constantes:

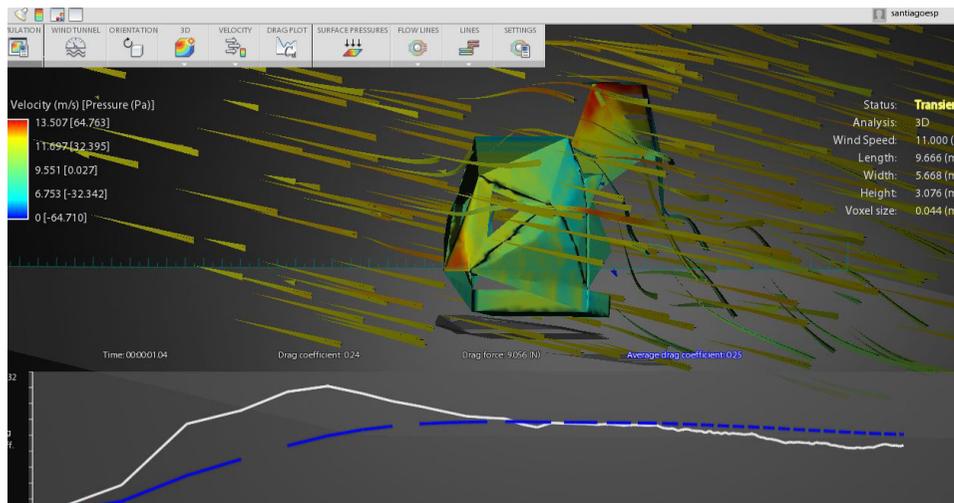
Velocidad relativa: 40 km/h = 11 m/s

Densidad del aire a 0 m.s.n.m (peor escenario): 1,15 kg/m³



Simulación virtual de túnel de viento del carenado del Protean Ackiu.

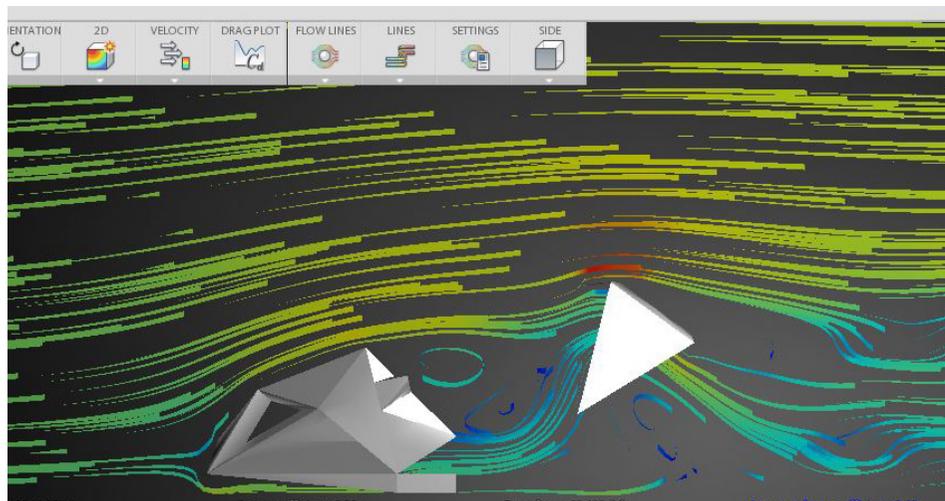
Fuente: Elaboración propia



Puntos de presión aerodinámica en el carenado del Protean Ackiu.
Fuente: Elaboración propia

$$P = \frac{C_x \times A_f \times \rho \times v^3}{2}$$

P : potencia
C_x: coeficiente de resistencia aerodinámica
A_f: área frontal
ρ : densidad del aire
v : velocidad



Flujo aerodinámico al interior del habitáculo del Protean Ackiu.
Fuente: Elaboración propia

Resultados:

Se debe hacer una ventilación trasera. Sino, el carenado trasero actúa como freno.

El piloto y las baterías reciben una buena ventilación.

Coefficiente de resistencia aerodinámica [C_x] = 0.25

La potencia necesaria para mover al Portean Ackiu a 40 km/h (11 m/s), es de 105,23 W con la geometría propuesta del carenado. El piloto del Protean Ackiu es capaz de entregar 200 W de potencia al pedalear, por lo que con la geometría propuesta se puede suplir esa potencia mínima.

3.2.2.8. Prototipo 8: Modelo del carenado en papel 1:5

Físico – integral

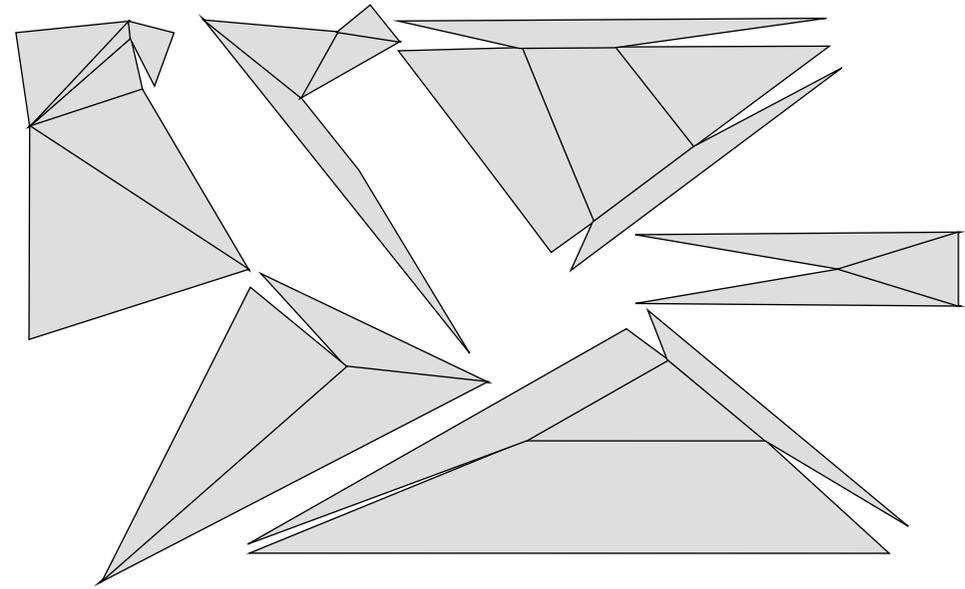
Descripción:

Ya habiendo validado la forma del carenado virtualmente, se fabricó un prototipo físico de papel plegado a una escala 1:5. Se montó sobre un modelo del chasis a la misma escala, para simular el aspecto final y la forma que tendrá el vehículo.

Propósitos a evaluar:

Ver una aproximación formal física del carenado y el chasis funcionando en conjunto.

Simular el proceso de conformado, a una menor escala.



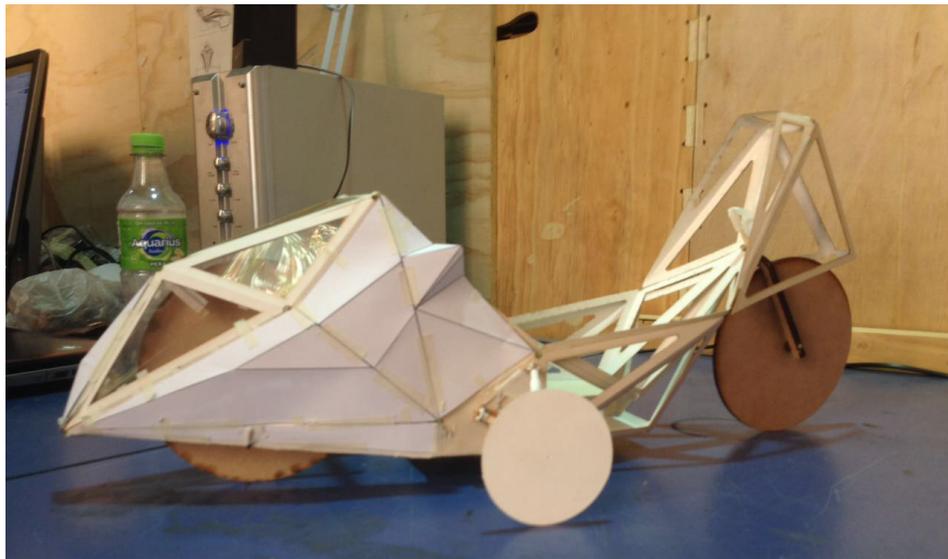
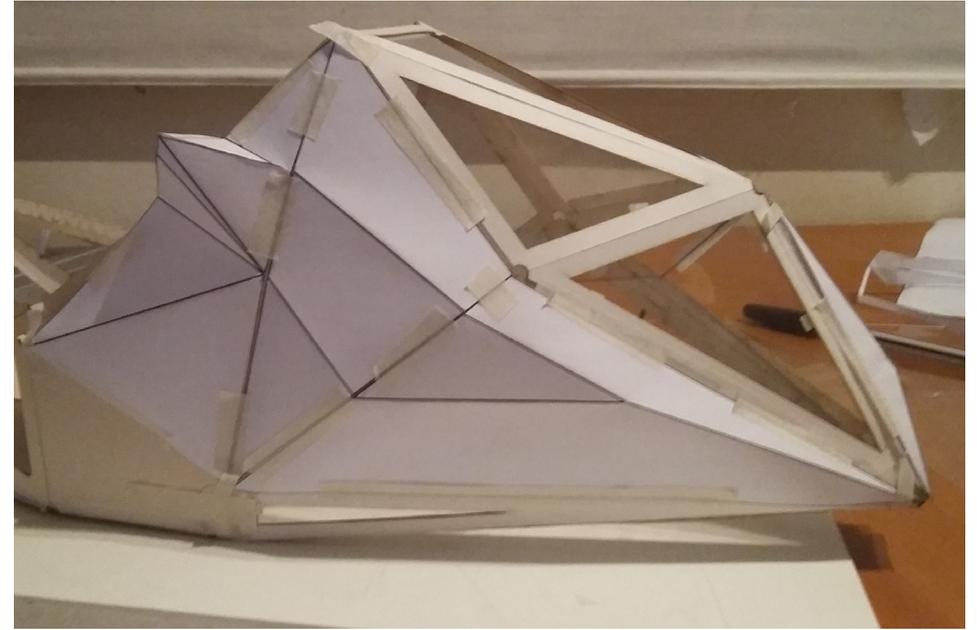
Pinatillas de corte del carenado del Protean Ackiu.
Fuente: Elaboración propia



Modelo del chasis del Protean Ackiu. 1:5
Fuente: Fotografía del autor



Modelo del carenado sobre el chasis del Protean Ackiu. 1:5
Fuente: Fotografía del autor



Modelo a escala 1:5 del Protean Ackiu.
Fuente: Fotografías del autor

3.2.2.9. Prototipo 9: Maqueta del carenado en cartón 1:1

Físico - integral

Descripción:

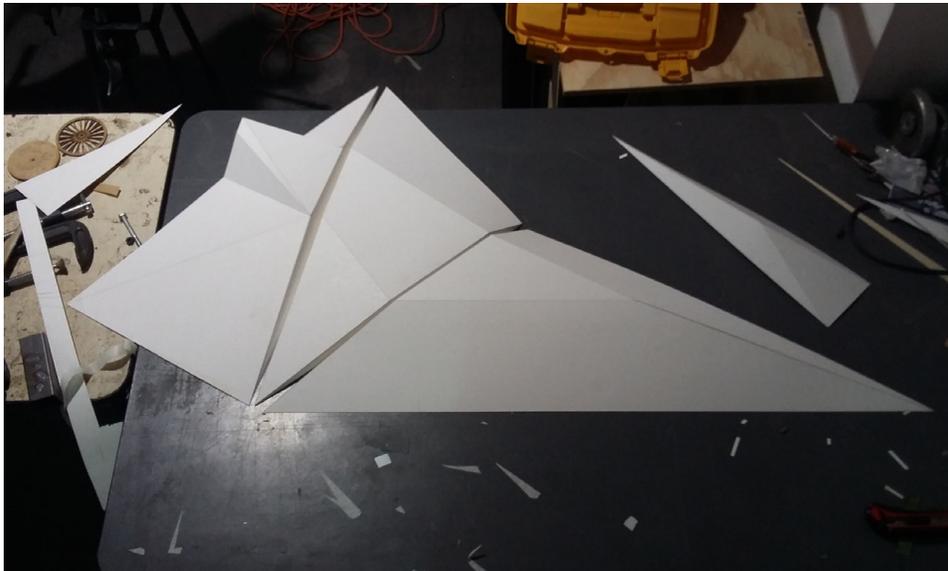
El prototipo 9 permite hacer una prueba de uso del vehículo, específicamente de pedaleo y visibilidad, sobre el modelo de pruebas del Ackiu, para garantizar que el carenado no interfiera con estas acciones. Además, es la primera aproximación 1:1 del carenado, por lo que entrega información valiosa de su manipulación, volumetría y aspecto, entre otros.

Propósitos a evaluar:

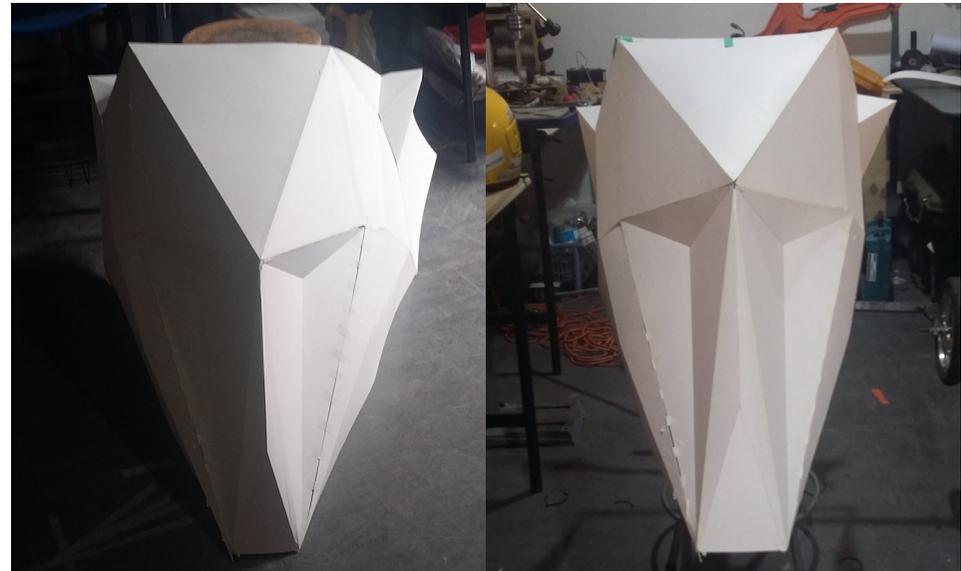
Corroborar que el la geometría del carenado no interfiera el pedaleo del piloto.

Corroborar que el carenado no obstaculice la visión del piloto.

Ver aspecto del carenado 1:1.



Paneles del carenado de Protean Ackiu en cartón forrado. 1:1
Fuente: Fotografías del autor



Modelo 1:1 del carenado del Protean Ackiu en cartón forrado.
Fuente: Fotografías del autor



Pruebas de pedaleo.
Fuente: Fotografía del autor



Modelo 1:1 del carenado en cartón forrado sobre el chasis de pruebas del Protean Ackiu.
Fuente: Fotografías del autor



Pruebas de pedaleo y visibilidad.
Fuente: Fotografía del autor

Resultados:

El piloto puede pedaleo con facilidad dentro del volumen que conforma el carenado.

El carenado permite que el piloto tenga buena visibilidad del camino y de sus alrededores.

Los espejos cumplen con las bases de la CSA.

3.2.2.10. Prototipo Alfa (10): Carenado del Protean Ackiu

Físico – integral

Descripción:

Con las bases del proceso productivo comprobadas con el prototipo 5, y el diseño del carenado, se comienza la fabricación de este. En esta prueba consta de dos etapas:

- 1) Fabricación del carenado como prototipo alfa, utilizando el proceso productivo desarrollado en este proyecto de título.
- 2) Comprobar que el proceso entrega resultados fiables en materiales compuestos, probando el funcionamiento del carenado en la CSA 2016.

La carrera sirve como instancia para ver el funcionamiento de los objetos fabricados con este proceso, identificar errores o fallas, y obtener información relevante para su solución.

Propósitos a evaluar:

Facilidad de fabricación, manipulación, transporte y reparación (si es necesario) del carenado.

Función del carenado, como producto fabricado con el proceso productivo de pliegue de compuestos.

Variables:

Esfuerzos a los que es sometido

Temperatura

Humedad

Usabilidad

Tiempo de uso

Constantes:

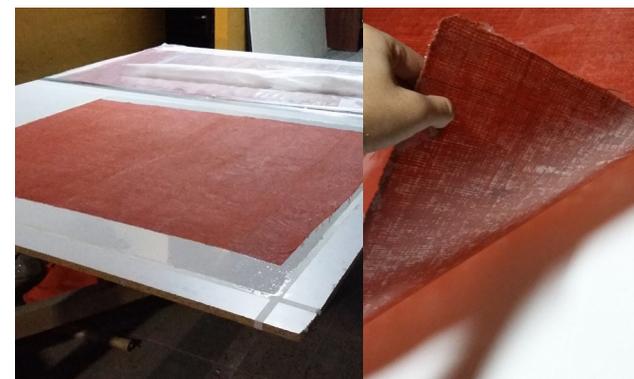
Forma

Material: Compuesto de yute + epoxi

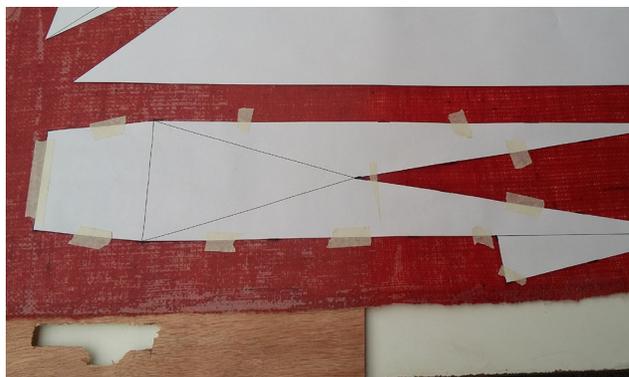
Fabricación: Plegado de compuesto, con refuerzo en las aristas de pliegue.



Fabricació del formató laminar de composto.
Fuente: Fotografías del autor

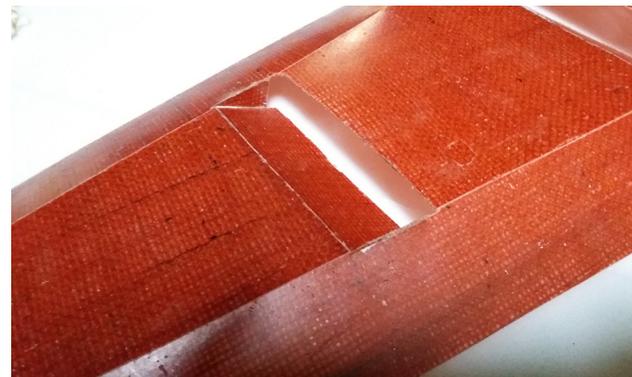
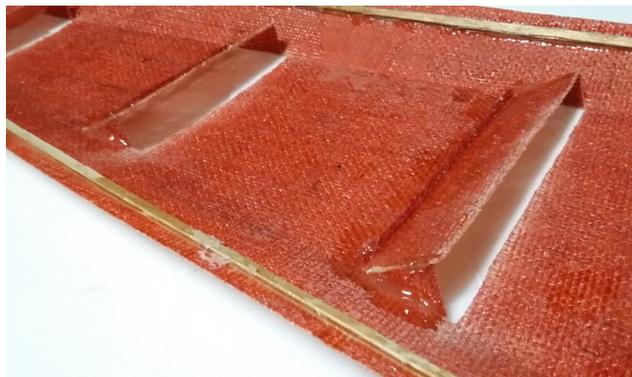
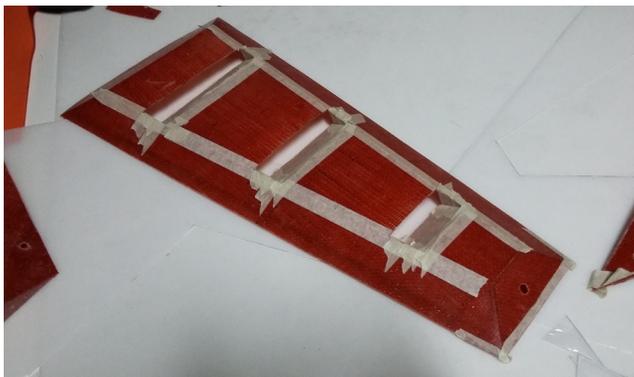


Corte del formató laminar de composto utilizando plantillas de corte.
Fuente: Fotografías del autor



Fabricación de los paneles del carenado de Protean Ackiu.
Fuente: Fotografías del autor





Fabricación de la compuerta trasera de acceso al sistema eléctrico del Protean Ackiu.
Fuente: Fotografías del autor



Unión al chasis.
Fuente: Fotografías del autor



Ensamble del carenado.
Fuente: Fotografías del autor



Funcionamiento modular del carenado del Protean Ackiu.
Fuente: Fotografías del autor



El carenado, al estar conformado por paneles independientes que funcionan modularmente, no necesita ser desensamblado en su totalidad del vehículo para realizar trabajos mecánicos.



Protean Ackiu en la Carrera Solar Atacama 2016.
Fuente: Fotografías del autor





La deformación del carenado durante la Carrera Solar Atacama 2016 dejaba espacios entre este y el chasis, los cuales se sellaron con duct tape. Este método también se ha utilizado para sellar las aperturas entre carenados en los vehículos Eolian.

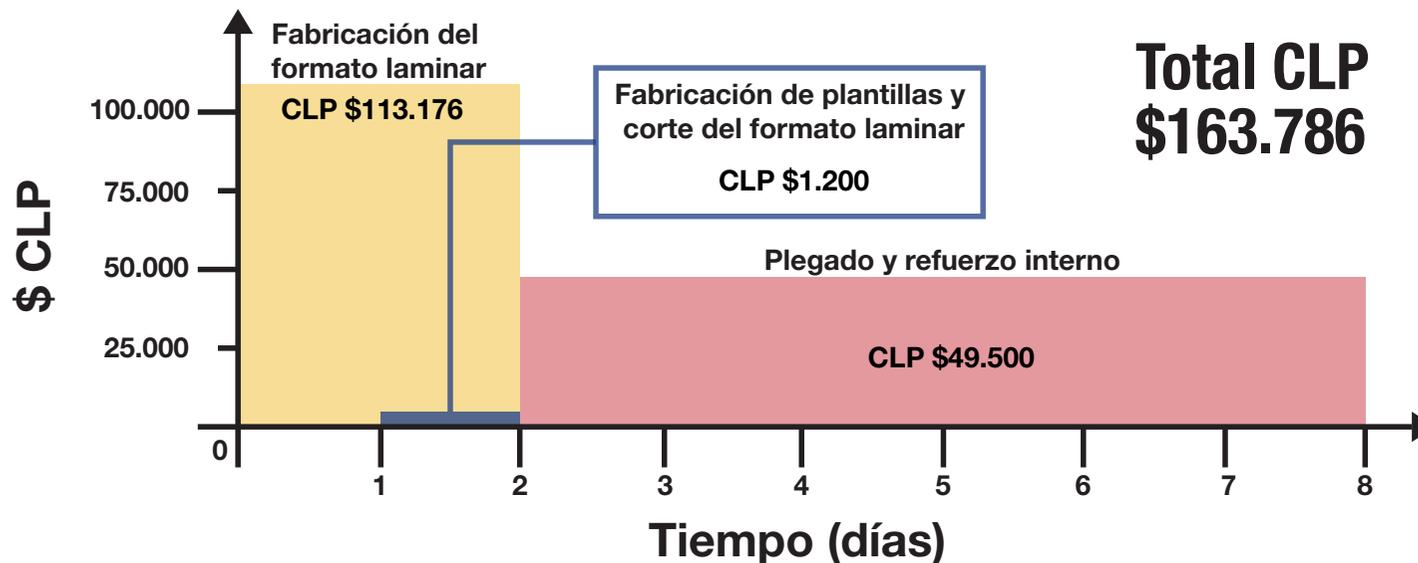
Deformación del carenado por humedad y temperatura.
Fuente: Fotografías del autor



Rotura de la compuerta trasera debido a una ráfaga de viento.
Fuente: Fotografías del autor



Rotura del panel trasero izquierdo debido a la caída de una batería.
Fuente: Fotografías del autor



**Peso total del carenado
1,693 Kg**

Gráfico de costo vs. tiempo de fabricación del carenado del Protean Ackiu, según etapas.
Fuente: Elaboración propia

Resultados:

El proceso productivo de plegado de compuestos entregó un producto que se desempeñó de buena manera en la CSA 2016.

El carenado cumplió su función de deflector aerodinámico, soportando esfuerzos mecánicos formados por el flujo de aire y vibraciones propias del vehículo, además de los drásticos cambios de temperatura características del norte de Chile (Calama en abril: máx 23 °C- min 2,2 °C).

Debido a la presencia de humedad en la zona costera, el carenado sufrió deformaciones. Esto sucedió ya que el compuesto de yute + resina epóxica tiene un índice de absorción de humedad del 9,5% de su peso. Esto obligó a sellar los espacios que aparecieron entre el carenado y el chasis utilizando cinta duct tape.

El carenado soportó bien la carga aerodinámica al desplazarse a 40 km/h durante la carrera, pero mientras se regresaba a Santiago por carretera a 120 km/h, transportando al Ackiu en el remolque, una ráfaga de viento rompió parte del carenado trasero, y en el acto, una batería suelta rompió otra sección.

Conclusiones:

El proceso productivo de plegado de compuestos fue validado, ya que el carenado fabricado cumplió su función siendo sometido a varios esfuerzos en carrera. Y en términos de costos, este proceso entregó un resultado que costó un 21% del de los recursos utilizados para la fabricación del Protean 1, y su fabricación duró un total de 8 días, mientras que el primer vehículo Protean se demoró aproximadamente un mes, destacando que en ese proceso trabajaron cuatro personas y en este solo una.

Sin embargo, hubo factores que necesitan ser corregidos. Se debe aumentar la rigidez y estructuralidad de los objetos fabricados con este proceso, para evitar deformaciones. De todas formas, cabe destacar que el carenado es un objeto dinámico sujeto a varios esfuerzos, por lo que el proceso productivo de plegado de compuestos podría funcionar para otro contexto y uso sin necesidad de un refuerzo extra.

3.2.2.11. Prototipo 11: Refuerzo interno

Físico – enfocado

Descripción:

Para aumentar la rigidez y darle mayor estructura a los resultados que entregue el proceso de plegado de compuestos, se decidió hacer un prototipo que busque resolver esta variable. Dado que el proceso entrega objetos que permiten su refuerzo interno, se decidió utilizar el método de laminado manual de FRP al interior de los volúmenes, resultando en el aumento del compuesto en una capa. Para esto se utilizó la matriz de ángulos del prototipo 4, donde se fabricaron las mismas probetas, pero con refuerzo interno.

Se reemplazó el pegamento epóxico del refuerzo de la arista, por resina epóxica con carga, ya que como se va a laminar, es innecesario realizar el refuerzo de la arista como otro paso aparte.

Propósitos a evaluar:

Aumentar la rigidez del resultado del proceso, reforzando con otra capa de yute + epoxi.

Variables:

Ángulos de las probetas: 90°, 60°, 45°, 30°, 15°.

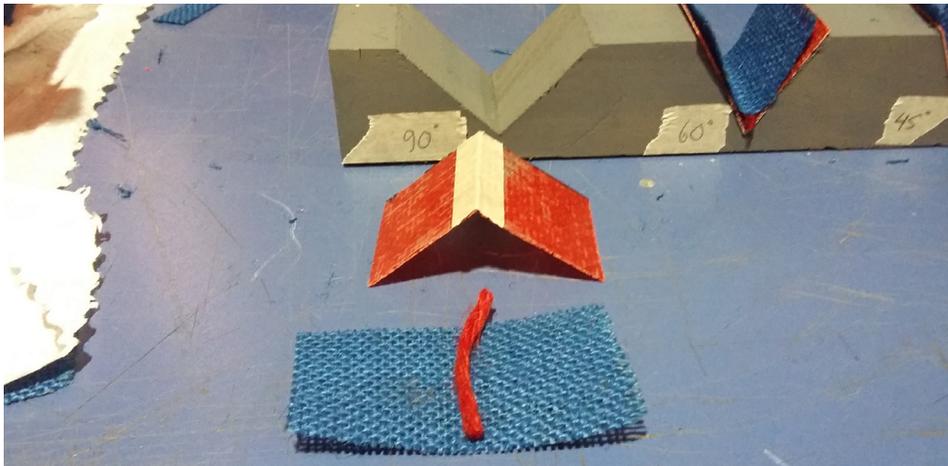
Yute molido + resina epóxica como carga. 15% de carga según el peso de la resina.

Constantes:

Compuesto de 1 capa de yute + resina epóxica laminado al vacío para capa externa.

Refuerzo de la arista de pliegue con cabo de yute de 3mm de diámetro y resina epóxica con carga.

1 capa de yute + resina epóxica como refuerzo interno.

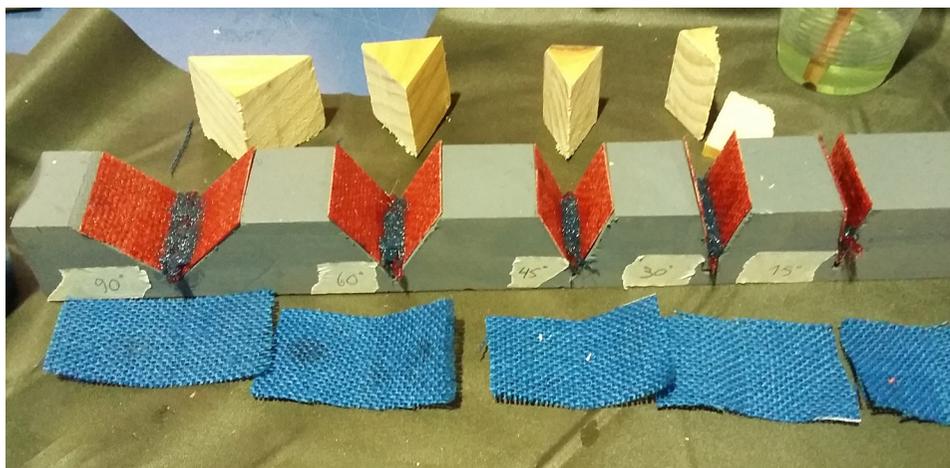


Refuerzo de la arista de pliegue con cabo de yute, tela de yute y resina epóxica.
Fuente: Fotografías del autor

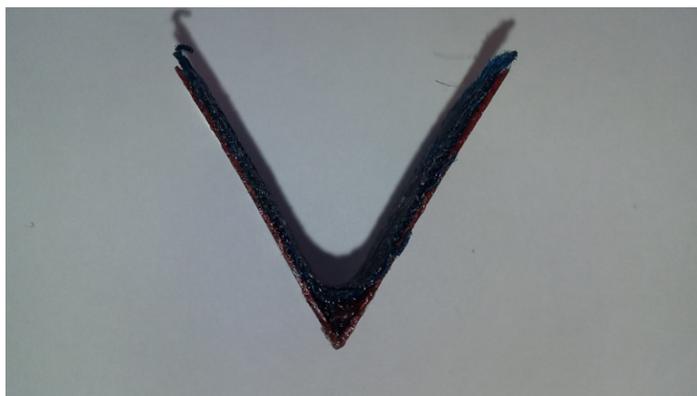
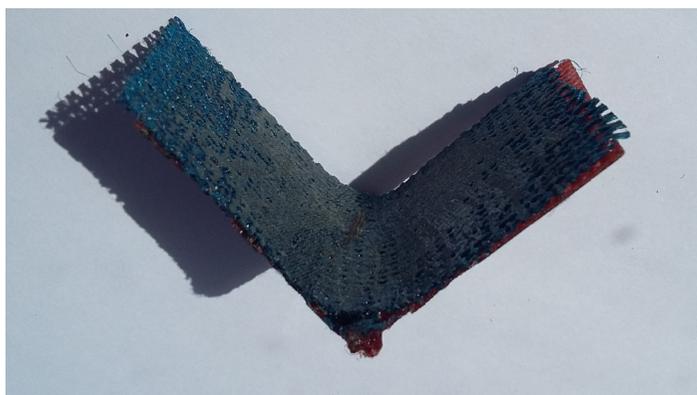
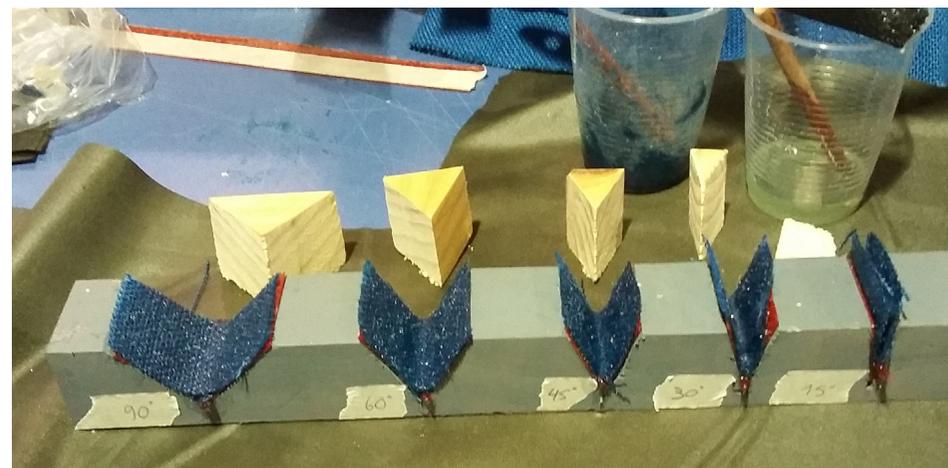


Yute molido como carga para resina epóxica.
Fuente: Fotografías del autor

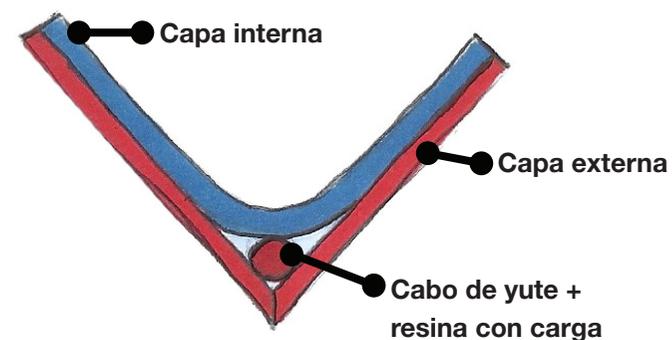




Refuerzo interno del plegado de compuesto, en matriz de ángulos.
Fuente: Fotografías del autor



Resultados del refuerzo interno del plegado de compuesto.
Fuente: Fotografías del autor



Esquema del refuerzo interno del plegado de compuesto en corte.
Fuente: Elaboración propia

Resultados:

Las probetas se sienten notablemente más rígidas que las fabricadas en el prototipo 4. Se necesitan hacer pruebas mecánicas para confirmar el aumento de resistencia.

El yute como carga para resina parece funcionar bien, ya que la espesa para poder aplicarla en las aristas de pliegue.

Con esta base, el siguiente paso es fabricar un prototipo volumétrico con refuerzo interno.

3.2.2.12. Prototipo 12: Refuerzo interno en volumen

Físico - integral

Descripción:

Siguiendo la metodología de los primeros prototipos, se decidió probar el refuerzo interno en la misma probeta utilizada en el prototipo 5 y ver su comportamiento.

En materiales compuestos, para poder laminar es necesario tener un molde o matriz que de soporte y permita obtener la forma deseada. En este caso, la probeta volumétrica entrega la geometría a laminar, por lo que no se necesitan moldes. Sin embargo, esto no da el soporte necesario para poder laminar, ya que se debe ejercer presión sobre las paredes de la probeta, y evitar que se deforme. Es por eso que se tomó la decisión de fabricar un contenedor para las probetas, que brindara el soporte necesario. Este contenedor, según los objetivos del proyecto, se diseñó pensando en que su precio y tiempo de fabricación fueran relativamente bajos, y que fuera reutilizable, evitando desecharlo luego de una producción de serie corta. Para esto se utilizó una caja de madera, con arena fina en su interior, que brindara el soporte al laminar, sin importar la geometría del objeto.

Para ahorrar tiempo, se decidió realizar dos pruebas de refuerzo interno en simultáneo, para probar distintas variables.

En este caso, las probetas no fueron reforzadas en sus aristas de pliegue con anterioridad, ya que este paso se incluyó en el proceso de refuerzo interno.

Propósitos a evaluar:

Reforzar internamente un objeto volumétrico laminándolo con fibra de yute + resina epóxica.

Variables:

Geometría volumétrica.

Compresión de las capas del compuesto: Probeta 1.A: sin compresión.

Probeta 2.B: compresión con arena al interior del volumen.

Elementos entre la arena y la probeta, para protección: Probeta 1.A: masking tape

Probeta 2.B: film plástico de PVC.

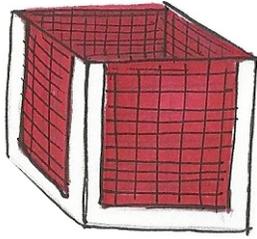
Constantes:

Compuesto de 1 capa de yute + resina epóxica laminado al vacío, para capa externa.

Refuerzo de la arista de pliegue con cabo de yute de 3mm de diámetro y resina epóxica con carga de yute.

1 capa de yute + resina epóxica como refuerzo interno.

1) Armar el volumen a fabricar.



2) Posicionar boca abajo en el contenedor con arena en su interior, luego cubrir con arena y cerrar la tapa superior.



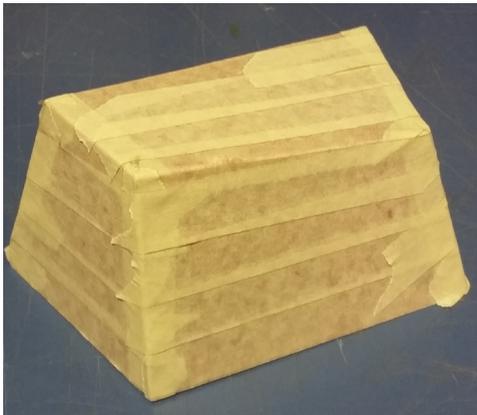
3) Dar vuelta el contenedor y remover la tapa, junto con la arena que estaba adentro del volumen.



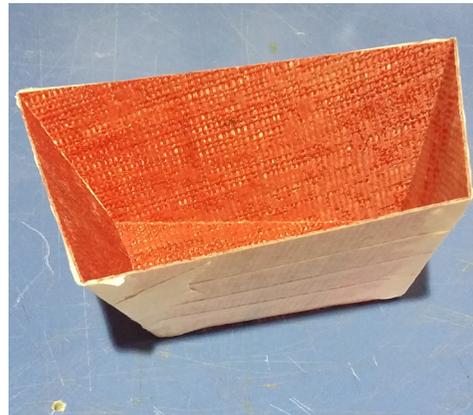
4) El volumen queda listo para ser reforzado internamente.



Proceso de refuerzo interno en molde de arena.
Fuente: Elaboración propia



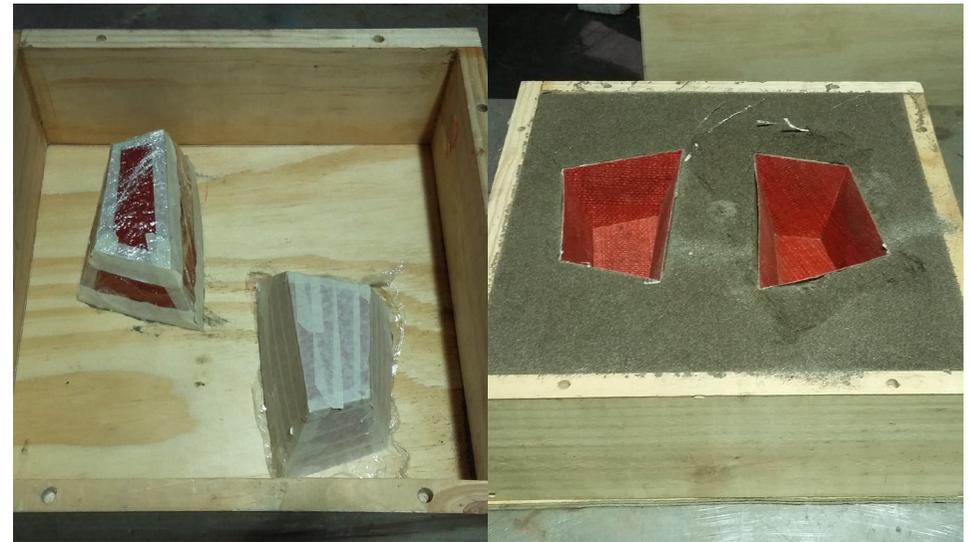
Probeta 1A.
Fuente: Fotografía del autor



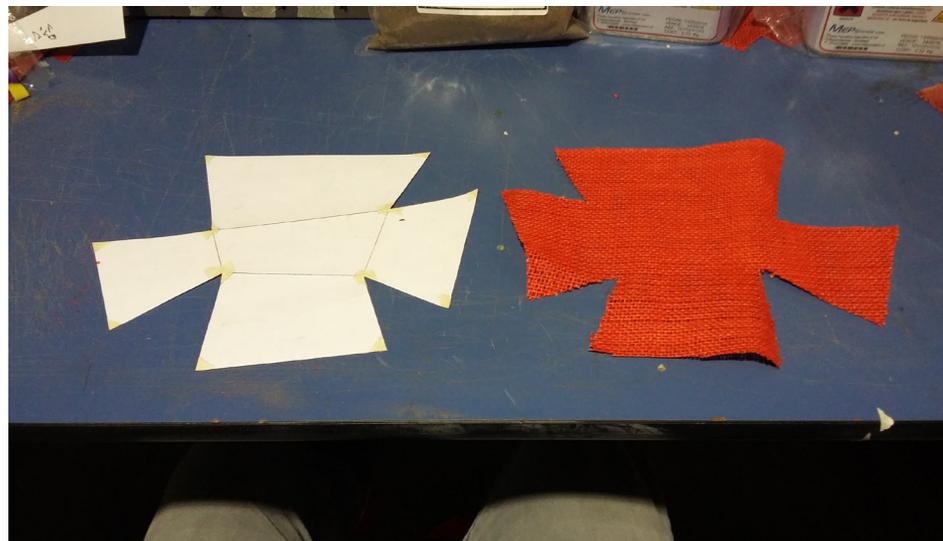
Probeta 1A.
Fuente: Fotografía del autor



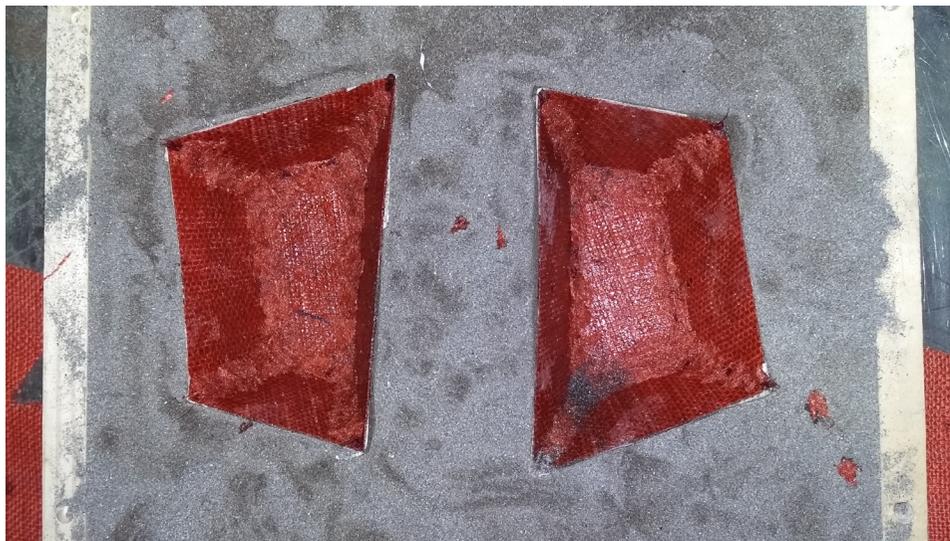
Probeta 1B.
Fuente: Fotografía del autor



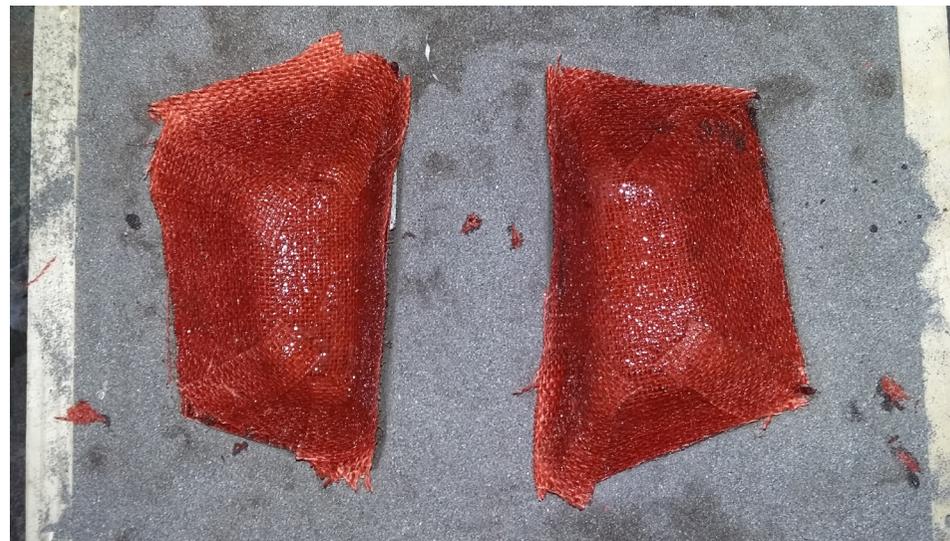
Preparación de las probetas en el contenedor.
Fuente: Fotografías del autor



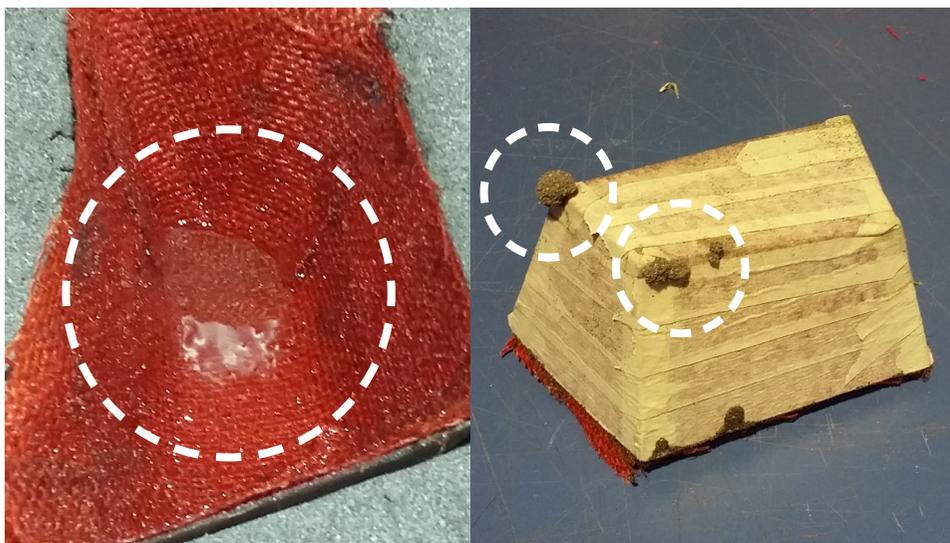
Corte de tela de yute seca para laminar dentro del volumen.
Fuente: Fotografías del autor



Refuerzo interno del volumen.
Fuente: Fotografías del autor

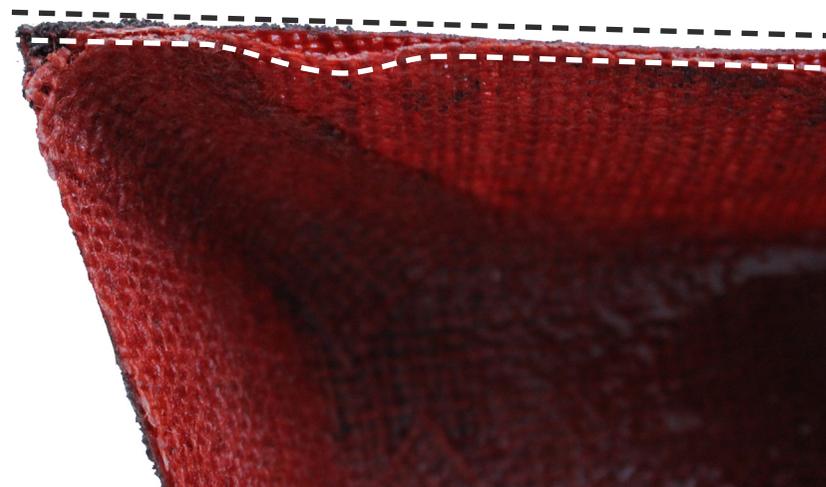


Presión interna en probeta 1A, sin presión interna en probeta 1B.
Fuente: Fotografías del autor



Probeta 1A, presenta resina decantada y filtraciones de resina hacia la arena.
Fuente: Fotografías del autor

86 gr

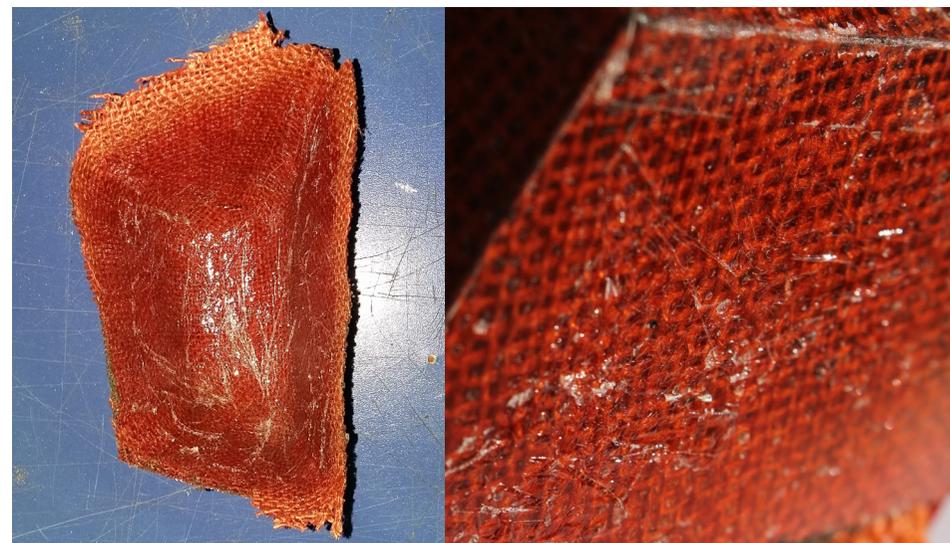


Probeta 1A, sin presión interna, presenta separación de capas.
Fuente: Fotografías del autor



Probeta 1B, con presión interna no presenta separación de capas.
Fuente: Fotografías del autor

89 gr



Probeta 1B, con recubrimiento de film plástico, presenta cúmulos de resina en la capa externa.
Fuente: Fotografías del autor

Resultados:

La probeta 1.A, sin compresión del compuesto, muestra separaciones entre la capa del volumen plegado y la capa de refuerzo. Además, la capa del volumen plegado muestra un pandeo hacia el interior de este, probablemente por la presión ejercida por la arena del contenedor. La probeta 1.B, con compresión del compuesto, muestra una mejor unión entre las capas, sin mostrar evidencia de separación. Tampoco se aprecia deformación de la geometría. Por lo tanto, se concluye que la presión interna del compuesto es una variable que entrega mejores resultados.

Como es común en los objetos laminados de FRP, hay una cara del objeto que presenta una terminación controlada, en cambio la otra cara presenta una terminación irregular por el proceso de laminado.

La probeta 1.A, recubierta con masking tape para proteger el compuesto de la arena de soporte, presenta filtraciones de resina en las aristas inferiores, formando cúmulos de resina con arena. Esto también hace que la cinta se pegue al compuesto, afectando la terminación en las aristas de pleigue. La probeta 1.B, recubierta con un film plástico de PVC, también presenta filtraciones, pero el plástico actúa como barrera conteniendo la resina y afectando la terminación de las caras del volumen. Se concluye que el masking tape presenta mejores resultados, pero hay que solucionar el problema de la filtración.

La probeta 1.A presenta un cúmulo de resina decantada al interior del volumen. La probeta 1.B, que pesa 3 gr más que la probeta A, debería tener un cúmulo similar, pero debido a la presión ejercida por la arena al interior del volumen, esta resina se esparce más uniformemente por el compuesto.

El paso siguiente es realizar una nueva etapa de prototipado para refinar las variables de la filtración de resina, y también se probará la aplicación de vacío para la compresión de las capas del compuesto.

3.2.2.13. Prototipo 13: Refuerzo interno en volumen 2

Físico - integral

Descripción:

En esta segunda prueba se busca refinar la etapa de refuerzo interno, utilizando la técnica de laminado al vacío del laminado de FRP. También se debe corregir la filtración de resina hacia la arena de soporte, y la terminación superficial que esto conlleva.

Nuevamente se utilizaron dos probetas para esta experimentación, con el fin de optimizar tiempo.

Propósitos a evaluar:

Identificar si hay diferencias considerables entre el laminado de refuerzo con vacío, comparando los resultados con los obtenidos en el prototipo 12.

Corregir el problema de la terminación superficial, resultante de la filtración de resina hacia la arena de soporte.

Variables:

Compresión de las capas del compuesto: Probeta 2.A: compresión por vacío sobre las paredes del compuesto al interior del volumen.

Probeta 2.B: compresión por vacío sobre la arena al interior del volumen.

Elemento entre la arena de soporte y la probeta: Probeta 2.A: desmoldante PVA + masking tape.

Probeta 2.B: cinta adhesiva transparente (scotch tape de celofán).

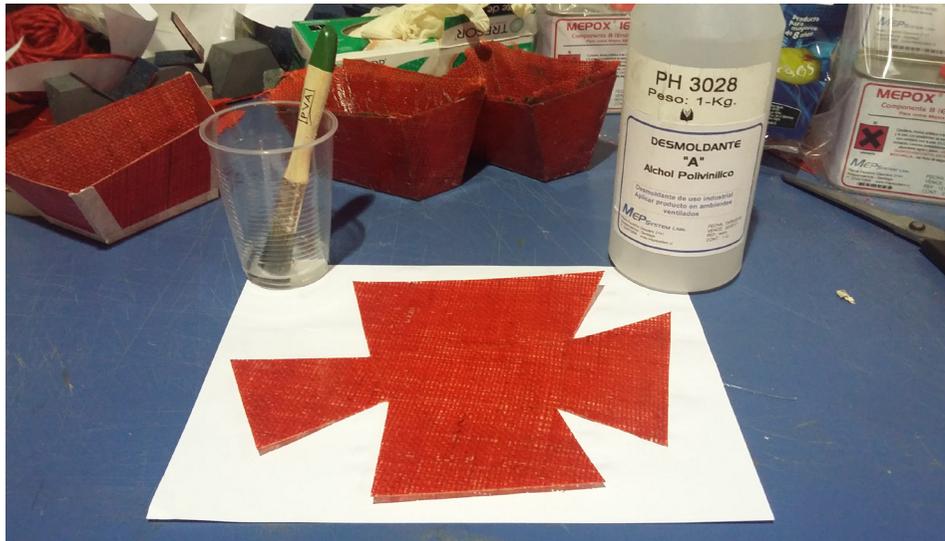
Constantes:

Compuesto de 1 capa de yute + resina epóxica laminado al vacío para capa externa.

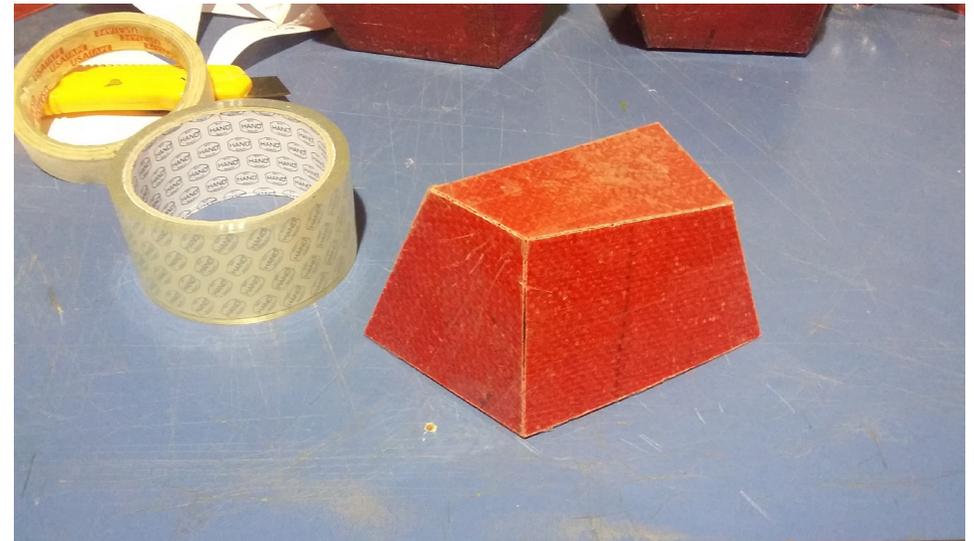
Refuerzo de la arista de pliegue con cabo de yute de 3mm de diámetro y resina epóxica con carga de yute.

1 capa de yute + resina epóxica como refuerzo interno.

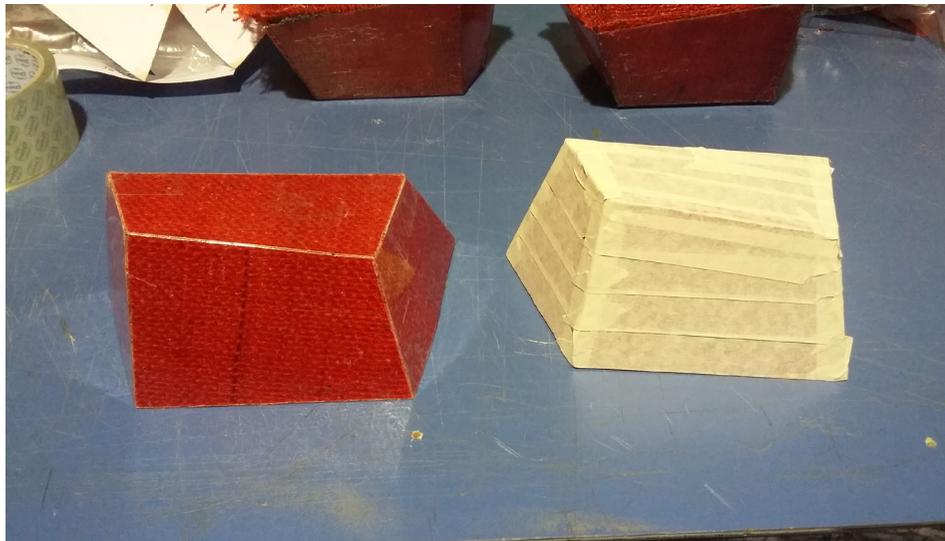
Presión interna.



Recubrimiento de desmoldante PVA.
Fuente: Fotografías del autor



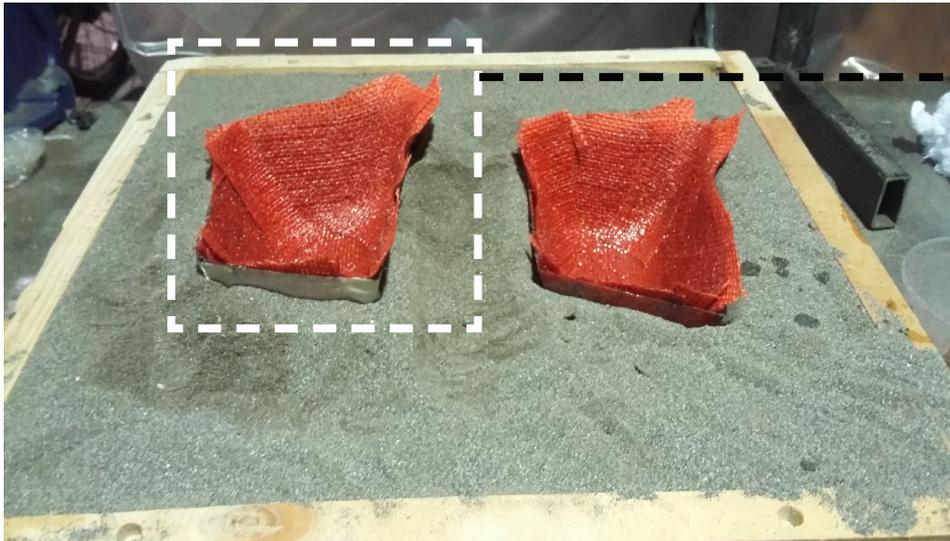
Recubrimiento de cinta adhesiva de celofán.
Fuente: Fotografías del autor



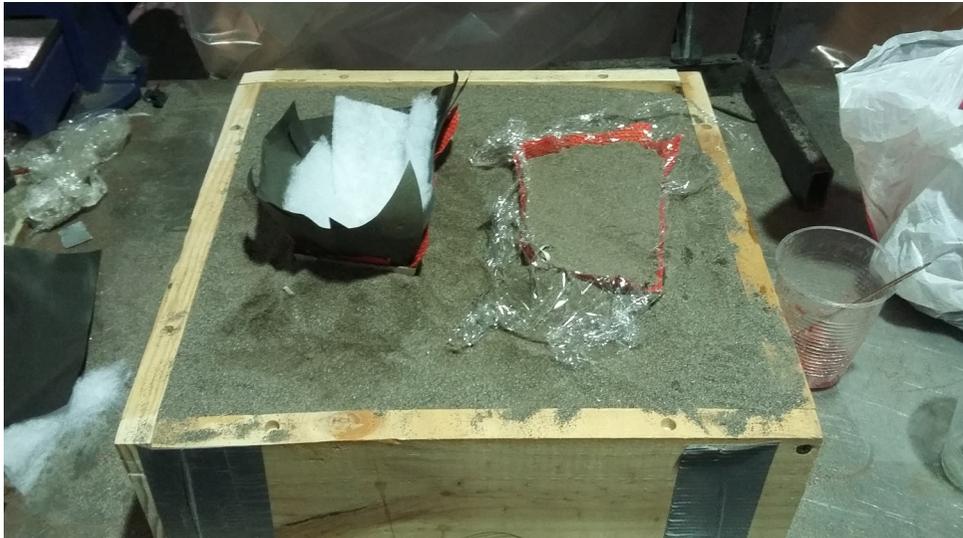
Probeta 2A (der.) y 2B (izq).
Fuente: Fotografías del autor



Probetas al ras en el contenedor con arena.
Fuente: Fotografías del autor



Probetas levantadas 12 mm sobre el nivel de la arena al laminar el interior del volumen.
Fuente: Fotografías del autor



Laminado al vacío en el contenedor.
Fuente: Fotografías del autor



Ambas probetas presentan filtraciones de resina hacia la arena.

Fuente: Fotografías del autor

Resultados:

Al momento de laminar, la presión ejercida sobre las paredes internas del volumen movió las probetas, cambiando su posición dentro del contenedor. Esto dificultaba el proceso de laminado, algo que no sucedió en la etapa de prototipado anterior.

La probeta 2.A, con aplicación de vacío sobre las paredes internas del compuesto, presenta separaciones entre capas, ya que al no ser un molde rígido, la bolsa de vacío no comprime las capas hacia las paredes de este, sino que hacia el interior del volumen, a diferencia de la compresión con arena al interior del volumen, que comprime las capas del compuesto contra la arena del contenedor. Además, se obtiene el mismo peso que en la probeta 1.A. La probeta 2.B, con aplicación de vacío sobre la arena al interior del volumen, presenta resultados y aspecto muy similares a la probeta 1.B, pesando solo 2 gr más. Se concluye que la aplicación de vacío no aporta un beneficio a la etapa de refuerzo interno.

La probeta 2.A, recubierta con desmoldante PVA y masking tape, presenta filtraciones similares al de la probeta 1.A, pero el desmoldante hace más fácil



Probeta 2A (izq.) con vacío aplicado sobre las paredes internas. Probeta 2B (der.) con vacío aplicado sobre la arena al interior del volumen.

Fuente: Fotografías del autor



2.A.: 86 gr

2.B.: 87 gr

su desprendimiento. No obstante, se evidencia que la terminación superficial empeoró, ya que quedan rastros de masking tape, en las aristas de pliegue, cubiertas de resina, lo que hace difícil su remoción. En cambio la probeta 2.B, recubierta con cinta adhesiva transparente de celofán, presenta la mejor terminación superficial de todas las probetas. Sin embargo, también tiene una filtración con gran cúmulo de resina con arena, pero probablemente fue por un error al momento de realizar el recubrimiento.

El yute molido utilizado como carga, al ser partículas macroscópicas, parece funcionar mejor como elemento de refuerzo mecánico que como elemento espesante. Además, como concentración de resina es mayor a la de la carga (85% resina - 15% carga), su exceso parece decantar, formando los cúmulos de resina presentes en las probetas.

En nuevas pruebas se buscará corregir el problema del movimiento de las probetas al interior del contenedor, y comprobar el uso de la cinta adhesiva de celofán como recubrimiento del volumen. También se buscará disminuir la cantidad de resina utilizada, para reducir el peso del compuesto.

3.2.2.14. Prototipo 14: Herramienta digital paramétrica para fabricación de plantillas de corte y posicionador de volumen.

Analítico- enfocado

Descripción:

Una constante en el proceso productivo de plegado de compuestos en FRP, es la fabricación de plantillas de corte, con la geometría desarrollada del volumen. Esto se puede hacer manualmente con la ayuda de los programas CAD 3D, donde se pueden explorar las posibilidades morfológicas del proceso, junto a las posibilidades de fabricación. Con la existencia de un universo morfológico poligonal que entrega una gran cantidad posible de geometrías, el desarrollo de plantillas para cada una de estas posibilidades es una tarea que puede agilizarse con estos programas computacionales. Con la ayuda del diseño generativo se desarrolló un algoritmo que permite obtener de manera automática los vectores de corte de estas plantillas para poder ser fabricadas, sin importar la geometría a construir.

Además, con la necesidad de resolver los problemas de movimiento en el prototipo 13, se planeó complementar esta herramienta de generación de plantillas, con un algoritmo de generación de vectores de corte para un soporte en base a costillas, también independiente de la geometría que se quiera desarrollar.

Para la fabricación de esta herramienta digital se utilizó el programa de diseño generativo Grasshopper 3D.

Propósitos a evaluar:

Desarrollar una herramienta digital que agilice la obtención de plantillas, para la conformación de objetos de compuesto plegado.

Desarrollar una herramienta digital que entregue los vectores de corte del soporte, para el laminado interno de objetos de compuesto plegado.

Variables:

Geometría volumétrica del objeto a fabricar.

Volumen interno del contenedor.

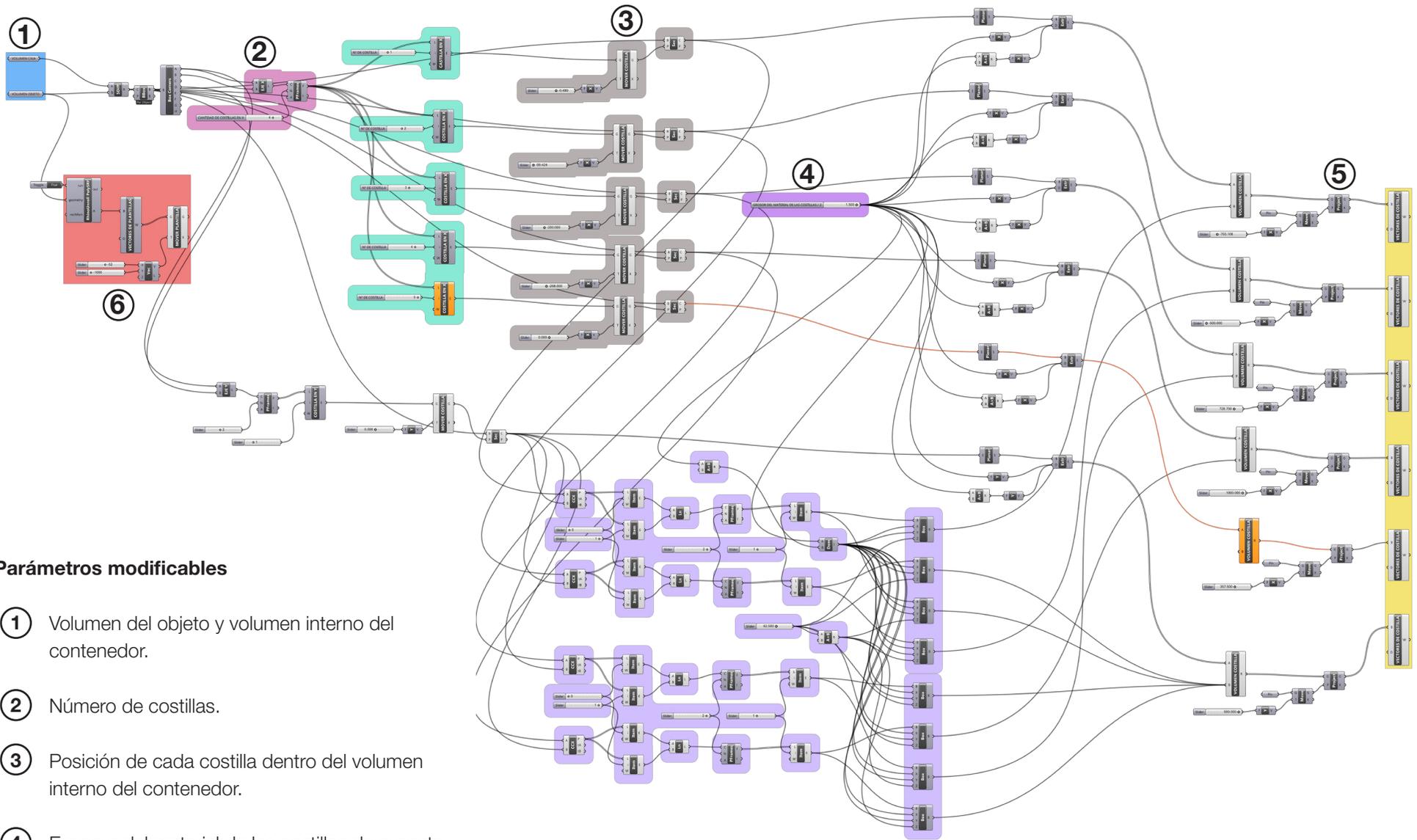
Número de costillas.

Posición de las costillas dentro del volumen del contenedor.

Grosor del material de las costillas.

Constantes:

Área operativa de la cortadora láser: 850 mm x 450 mm



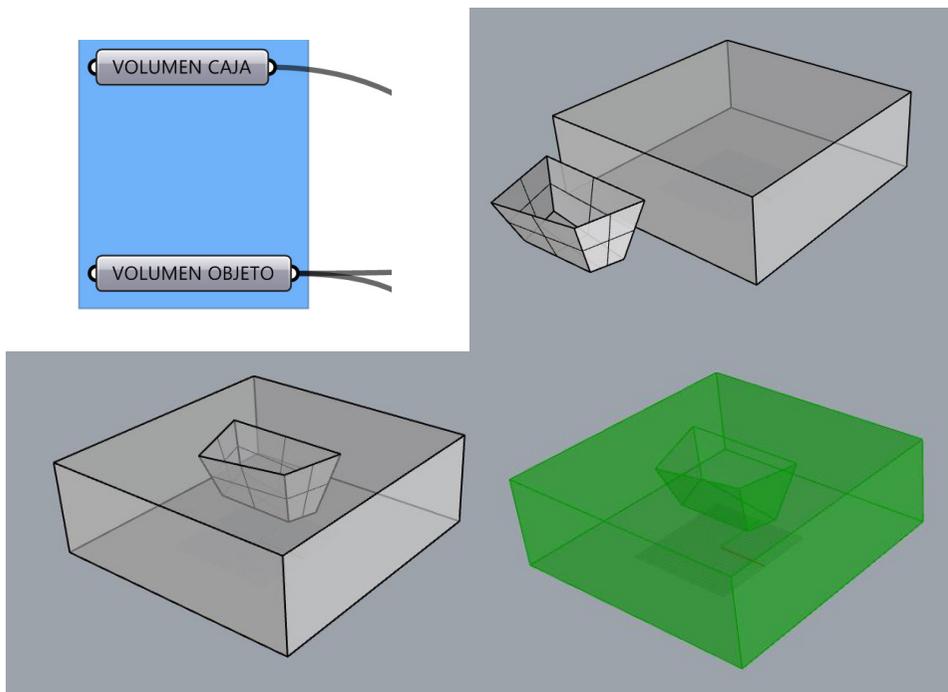
Parámetros modificables

- ① Volumen del objeto y volumen interno del contenedor.
- ② Número de costillas.
- ③ Posición de cada costilla dentro del volumen interno del contenedor.
- ④ Espesor del material de las costillas de soporte, para regular el calce entre sí.
- ⑤ Posición de las plantillas.
- ⑥ Posición de las plantillas.

Algoritmo generativo de obtención de plantillas y vectores de corte de costillas de soporte.
Fuente: Elaboración propia

①

El volumen interno del contenedor, junto al de la pieza a fabricar, deben ser modelados por el usuario. Para que la herramienta funcione, el modelo de la pieza debe estar alineado con la cara superior del volumen interno del contenedor, para que se puedan fabricar digitalmente los soportes. El 3D de la pieza debe ser además un modelo de superficie, sin su cara superior, para que al plegar el volumen se pueda laminar internamente sin problemas.

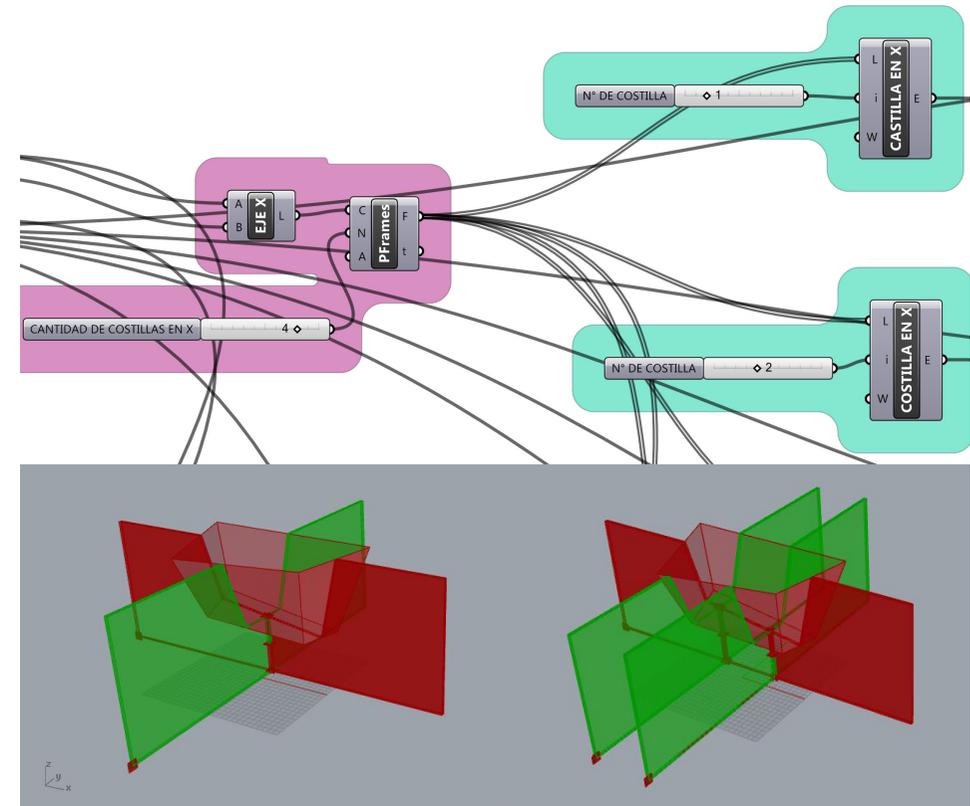


Volumen interno del contenedor y volumen del objeto a fabricar.

Fuente: Elaboración propia

②

Se puede modificar el número de costillas, para que las distintas geometrías a fabricar puedan contar con un soporte estable. Cada costilla puede ser manipulada individualmente.

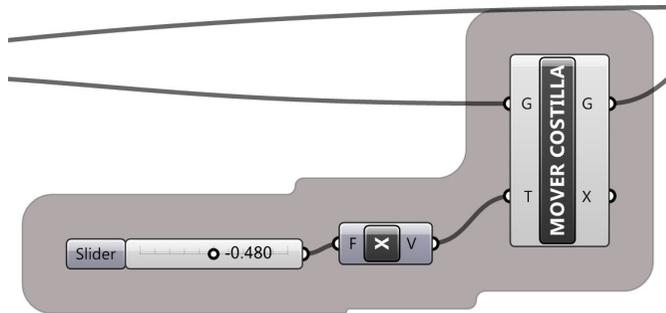


Modificador de cantidad de costillas.

Fuente: Elaboración propia

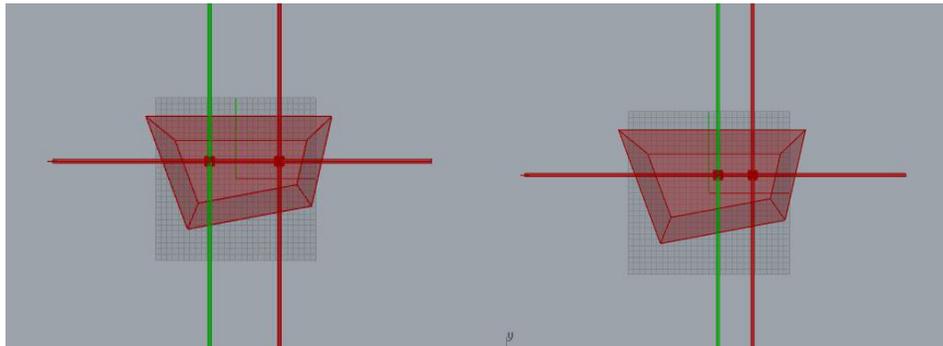
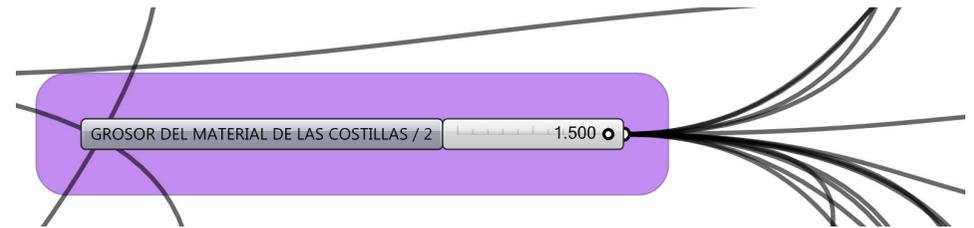
③

Cada costilla se puede desplazar horizontalmente, para posicionarla sobre los puntos de la geometría que necesiten mayor soporte.

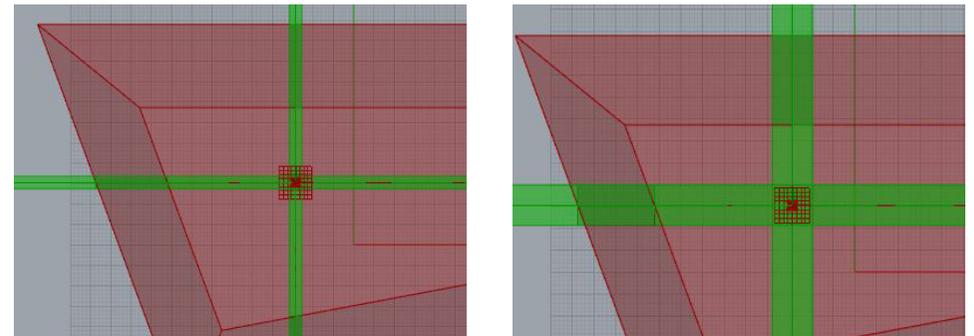


④

Pensando en la fabricación, se incluyó un controlador de espesor del material de las costillas, que además controla el calce entre ellas. En el controlador se debe ingresar el grosor del material a utilizar, dividido por dos. Por ejemplo, para fabricar las costillas en MDF de 3mm, se debe ingresar el valor 1,5 en el controlador.



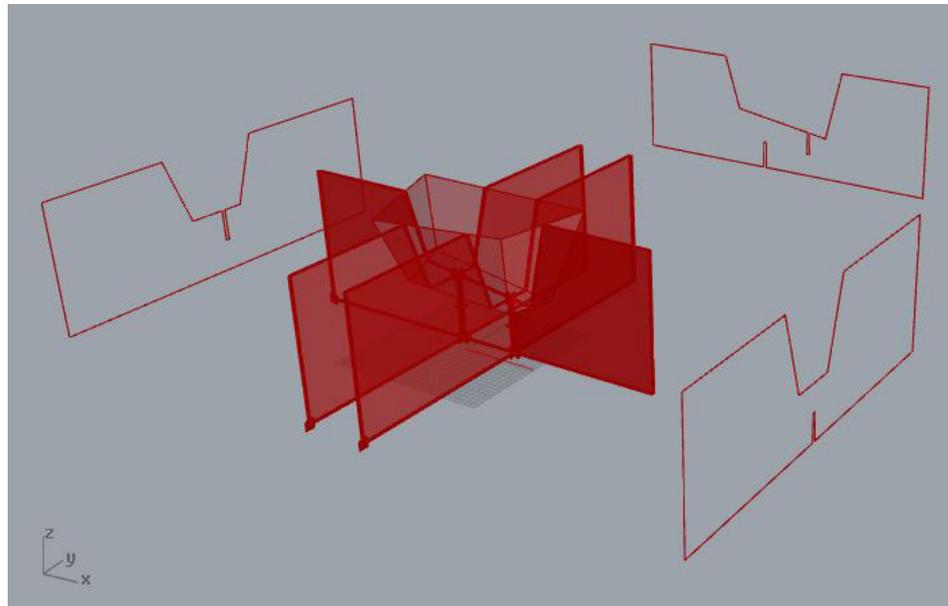
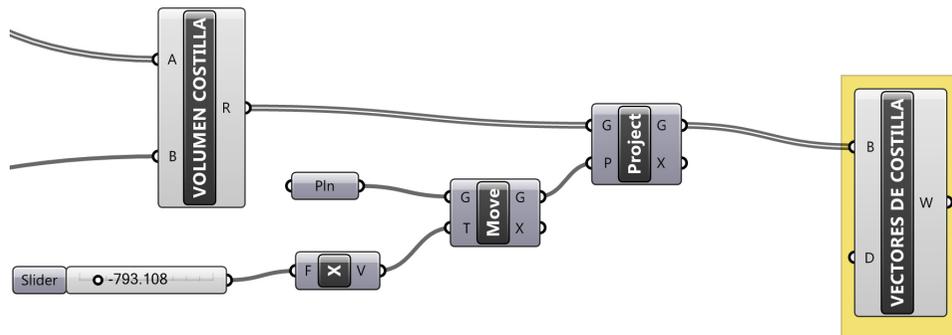
Modificador de posición de costillas.
Fuente: Elaboración propia



Modificador de espesor de material de costillas.
Fuente: Elaboración propia

⑤

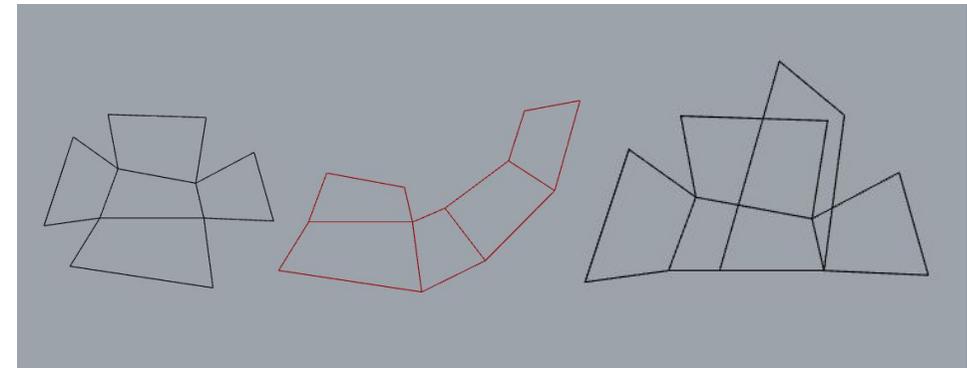
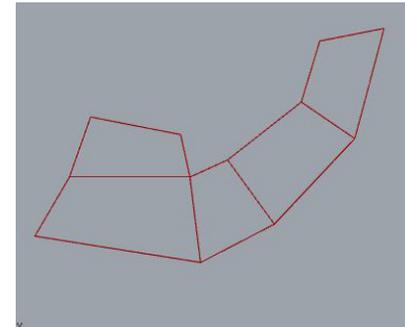
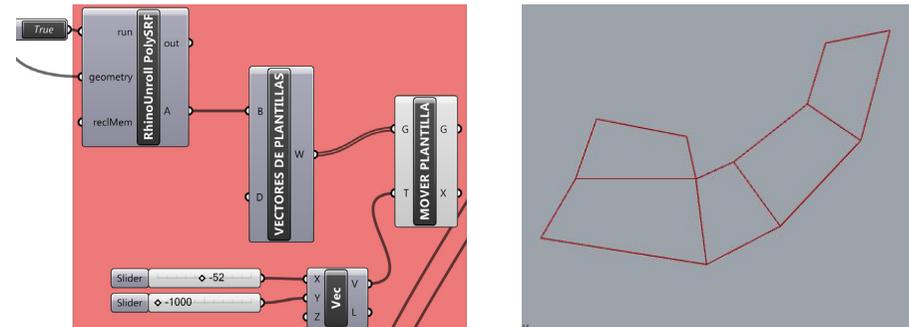
Se integró un controlador de posición de los vectores de corte resultantes, para facilitar su visualización en el programa CAD.



Modificador de vectores de corte de costillas.
Fuente: Elaboración propia

⑥

Se integró un controlador de posición de los vectores de la plantilla, al igual que con los vectores de corte de las costillas.



Plantillas de corte.
Fuente: Elaboración propia

Las plantillas generadas aparecen unidas de forma aleatoria por las aristas de las caras. Se deben corregir manualmente para que el corte del formato laminar de compuesto sea lo más optimizado posible. Además, hay veces que las caras se superponen. Esto también debe corregirse manualmente, para que las plantillas funcionen.

Resultados:

Las costillas de soporte se generan de forma óptima, logrando buenos resultados sin importar que cambien los parámetros modificables.

Se deben corregir los problemas existentes en la generación de plantillas, para que la herramienta funcione de manera automática.

3.2.2.15. Prototipo 15: Refuerzo interno del volumen 3

Físico - integral

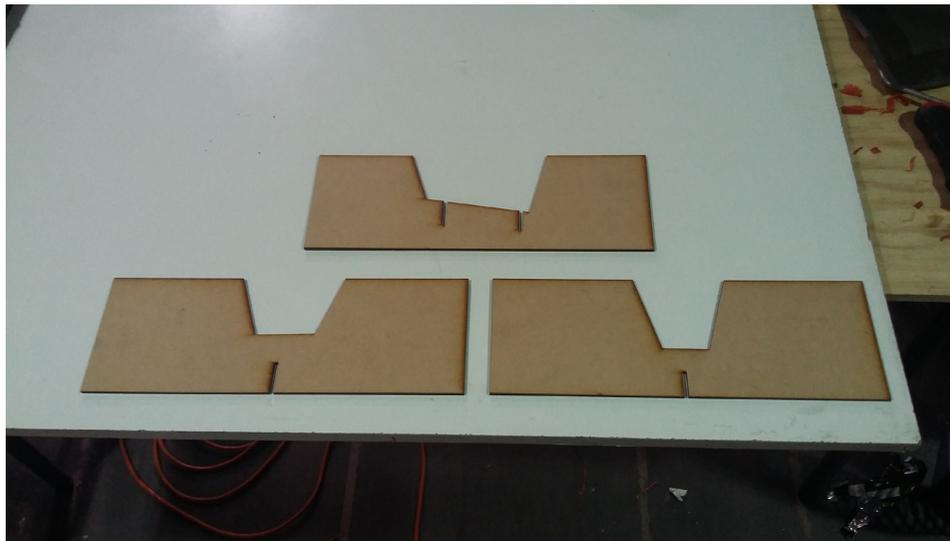
Descripción:

Ya teniendo los vectores de corte del soporte, se pudo fabricar utilizando la tecnología CAM, específicamente el corte láser debido su naturaleza laminar de sus componentes. Con este prototipo se busca mejorar el proceso de laminado interno, probar nuevamente el uso de cinta adhesiva como barrera contra las filtraciones y reducir el uso de resina en la probeta, para disminuir su peso.

Propósitos a evaluar:

Comprobar si hay mejoras en el proceso de laminado, utilizando el soporte del volumen.

Reducir el uso de resina en el compuesto, para disminuir su peso.



Costillas de soporte.

Fuente: Fotografías del autor

Variables:

Uso del soporte del volumen.

Preimpregnar la tela de yute antes de laminar, para utilizar la cantidad justa de resina.

Utilizar talco como carga espesante al 15% del peso de la resina, en vez de yute.

Constantes:

Geometría volumétrica.

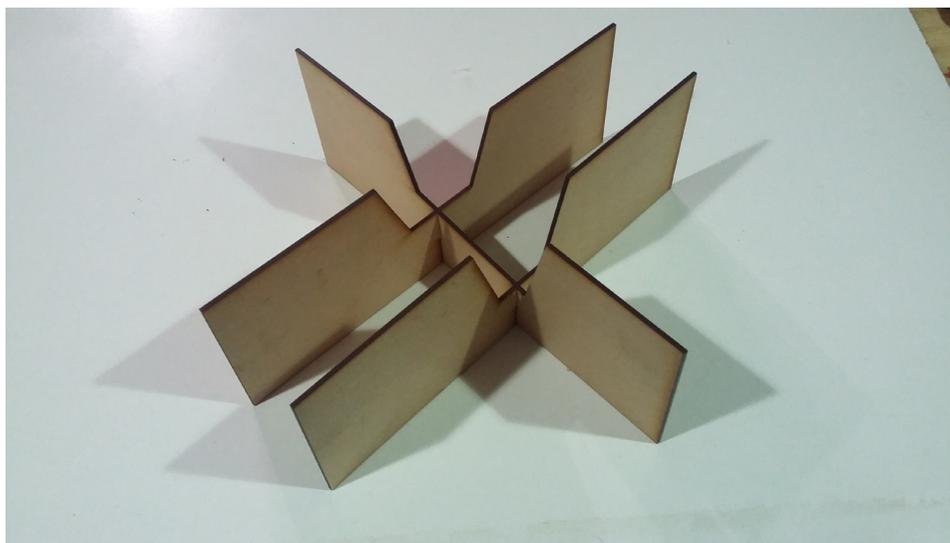
Arena como material de soporte, externo e interno del volumen.

Compuesto de 1 capa de yute + resina epóxica laminado al vacío para capa externa.

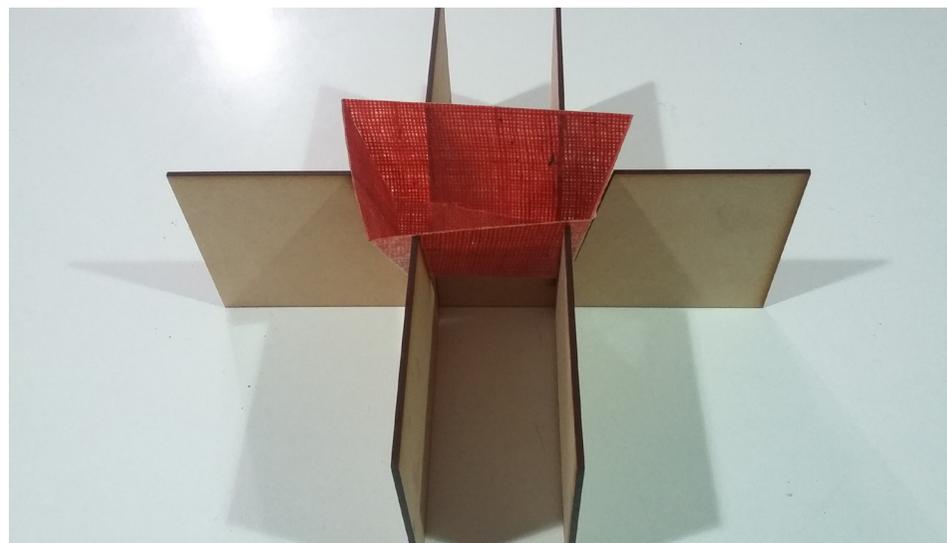
Refuerzo de la arista de pliegue con cabo de yute de 3mm de diámetro y resina epóxica con carga de talco.

1 capa de yute + resina epóxica como refuerzo interno.

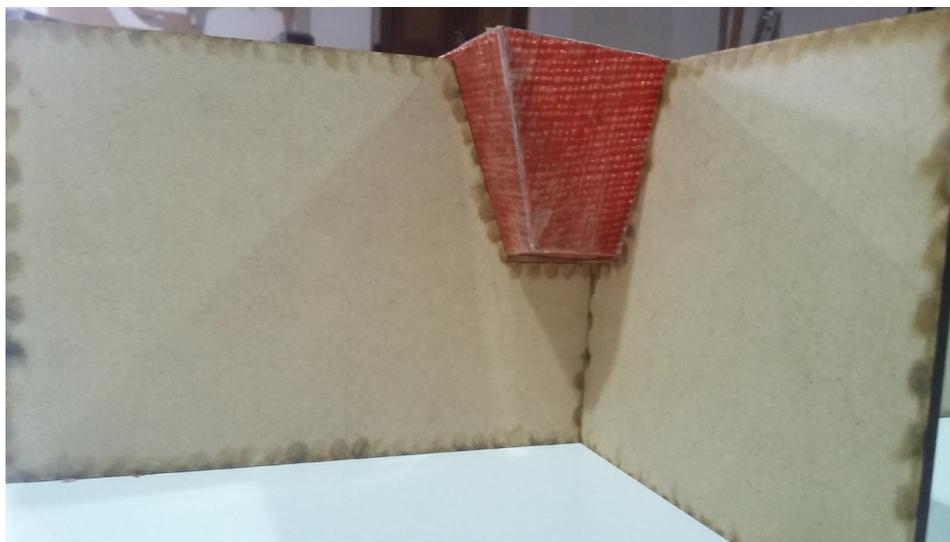
Presión interna.



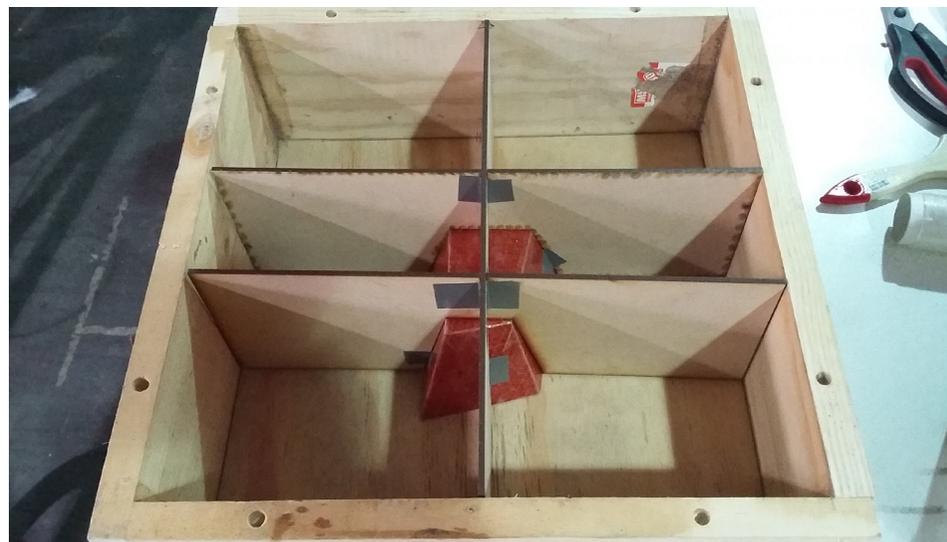
Costillas de soporte.
Fuente: Fotografías del autor



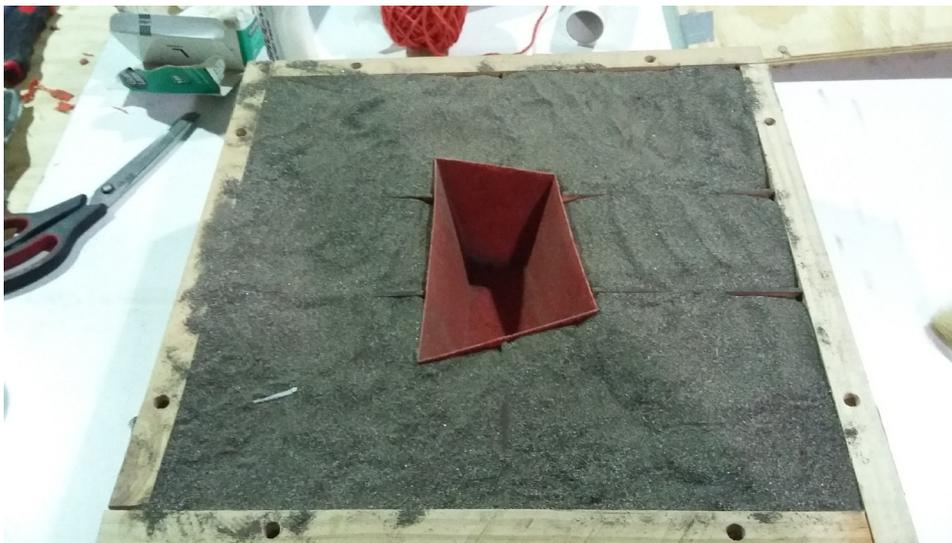
Costillas de soporte conteniendo al volumen.
Fuente: Fotografías del autor



Costillas de soporte conteniendo al volumen.
Fuente: Fotografías del autor



Costillas de soporte conteniendo al volumen dentro del contenedor.
Fuente: Fotografías del autor



Probeta contenida por costillas y arena de soporte.
Fuente: Fotografías del autor



Talco como carga para el refuerzo de los cantos internos.
Fuente: Fotografías del autor



Preimpregnado de la tela a laminar.
Fuente: Fotografías del autor

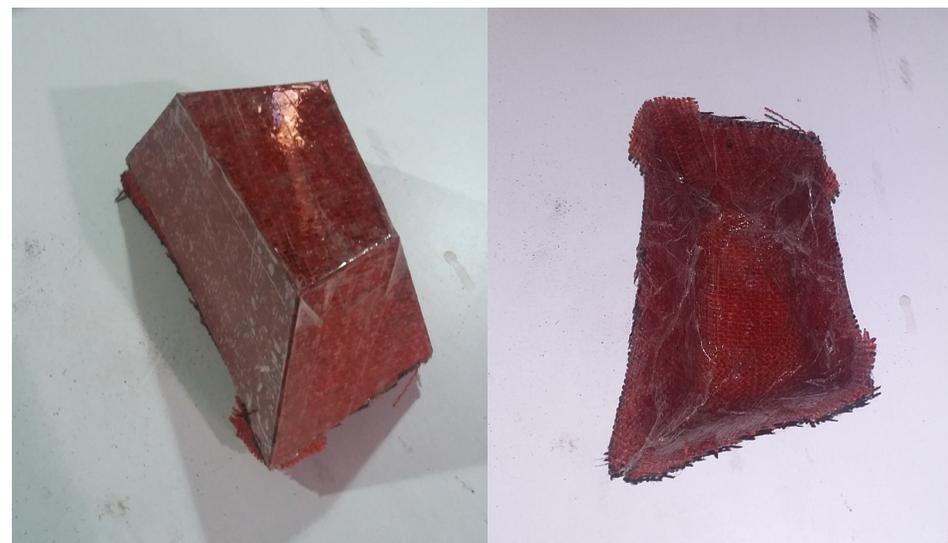


Refuerzo interno del volumen, utilizando costillas de soporte.
Fuente: Fotografías del autor

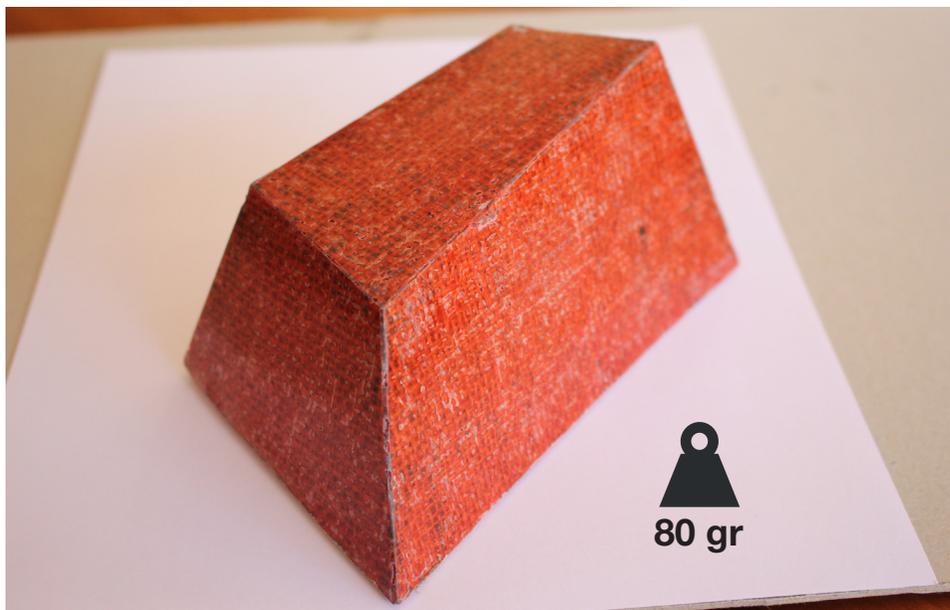




Probeta reforzada internamente.
Fuente: Fotografías del autor



La probeta no presenta filtraciones de resina hacia la arena.
Fuente: Fotografías del autor



Resultado del laminado interno con costillas de soporte.
Fuente: Fotografías del autor

Resultados:

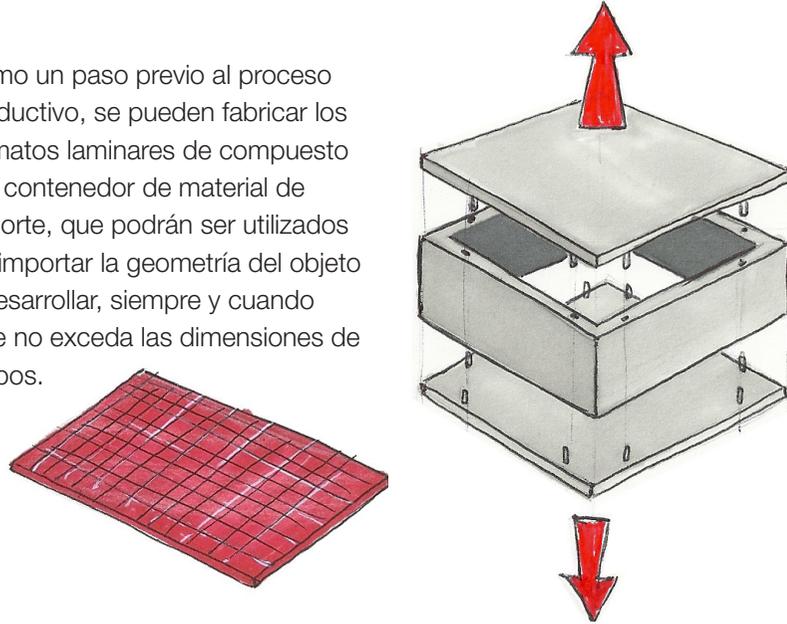
El proceso de laminado se facilita notablemente, al obtener un mejor soporte. El conjunto de la arena con las costillas de soporte entrega estabilidad al laminar, manteniéndolo fijo el volumen sin permitir un cambio de posición de la pieza.

Con el preimpregnado de la tela de yute y el uso de talco como carga espesante, se logró reducir el peso del compuesto, obteniendo la probeta volumétrica con refuerzo interno más liviana hasta el momento, con 80 gr.

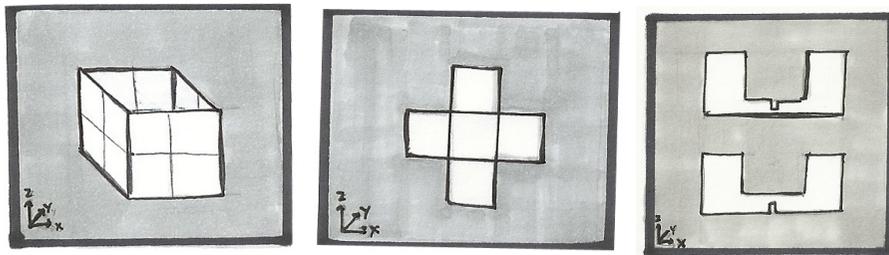
3.3. Conclusiones de la experimentación

Tras la etapa de prototipado, se identificaron los pasos necesarios que conforman el proceso productivo desarrollado.

- 0 Como un paso previo al proceso productivo, se pueden fabricar los formatos laminares de compuesto y el contenedor de material de soporte, que podrán ser utilizados sin importar la geometría del objeto a desarrollar, siempre y cuando este no exceda las dimensiones de ambos.

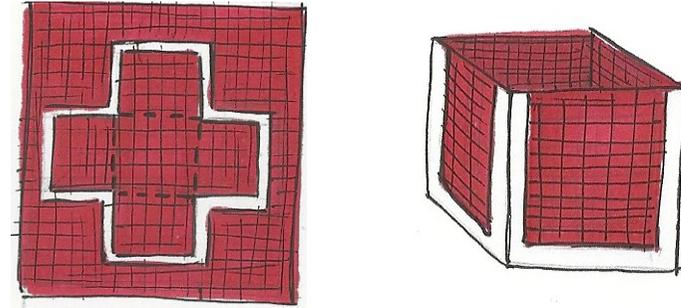


- 1 En esta etapa se hace presente la fabricación digital y las tecnologías CAD/CAM. Se debe modelar el objeto a fabricar, tomando en cuenta que debe estar compuesto por caras poligonales. Con el diseño listo, se puede utilizar la herramienta digital de generación de plantillas y vectores de corte.

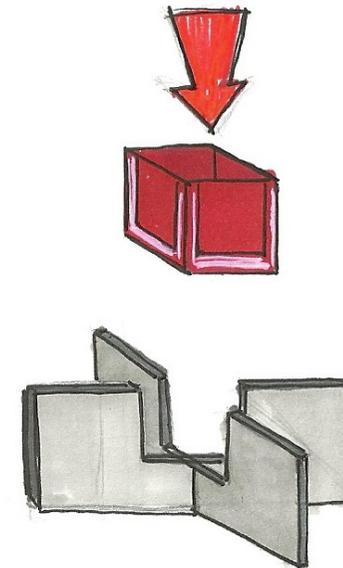


Esquema de los pasos del proceso productivo.
Fuente: Elaboración propia

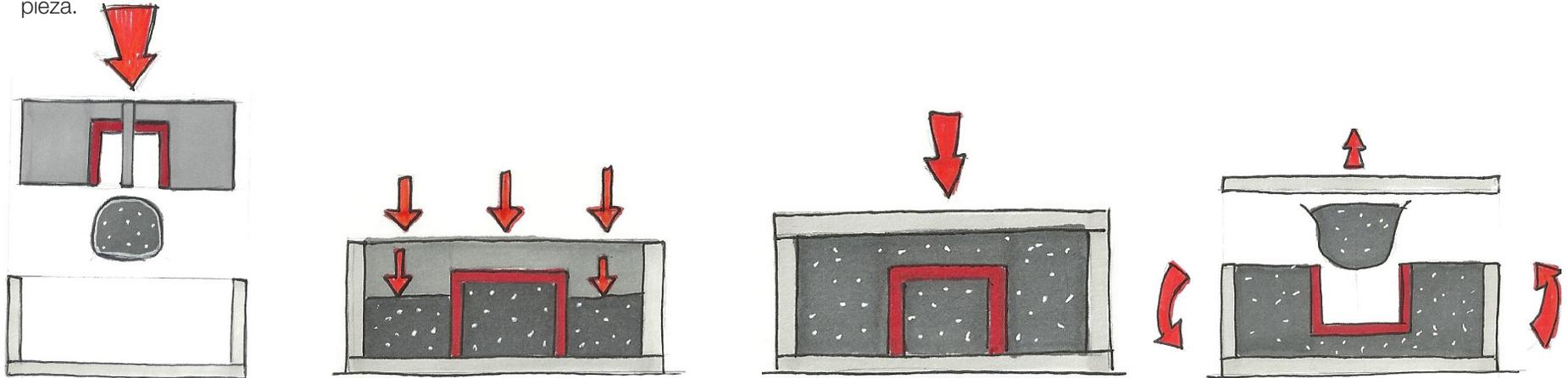
- 2 Teniendo las plantillas, ya se puede cortar el formato laminar y armar el volumen, recubriéndolo con cinta adhesiva para evitar filtraciones de resina hacia la arena.



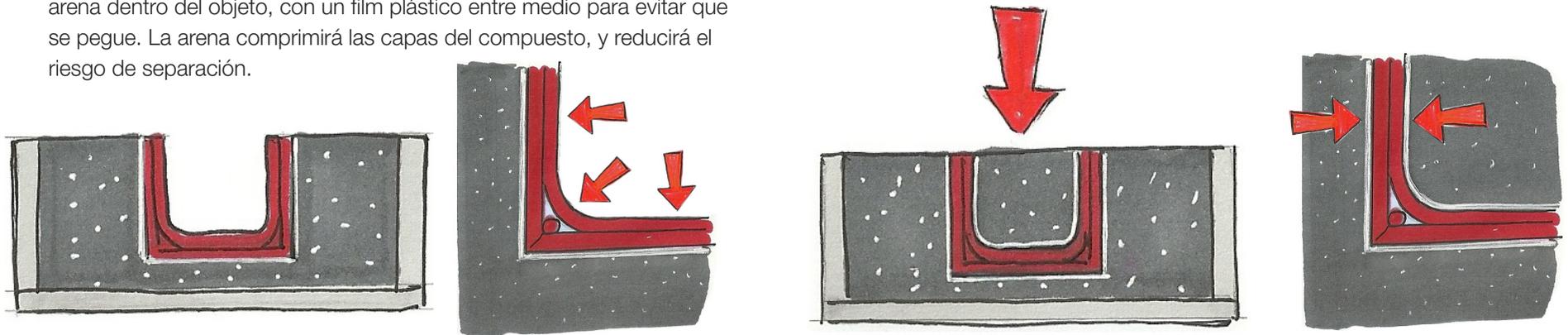
- 3 El paso siguiente es fabricar las costillas de soporte, que le darán estabilidad al objeto a reforzar. Para eso se pueden utilizar las tecnologías de manufactura asistida por computadora, para garantizar precisión.



- ④ El objeto se debe posicionar con las costillas dentro del contenedor, para luego llenarlo con la arena que le dará un soporte uniforme en toda la superficie. Para que la presión de la arena no deforme al objeto, este se debe llenar también con arena. El siguiente paso es sellar el contenedor, darle vuelta y abrir la ahora tapa superior para poder reforzar el interior del objeto. Cabe destacar que se debe retirar la arena que había dentro de la pieza.



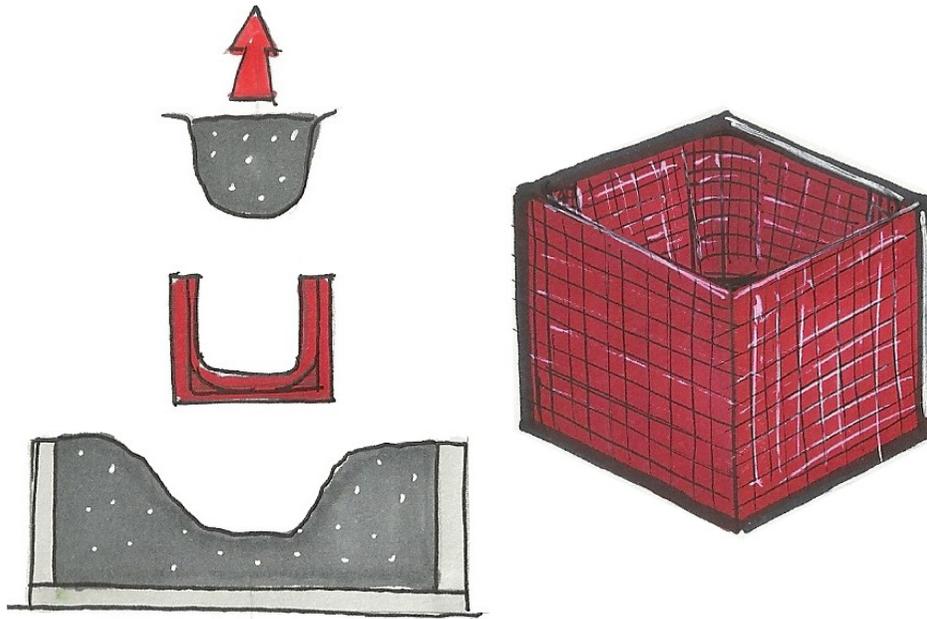
- ⑤ Antes de laminar internamente el objeto, se deben reforzar los cantos internos con fibras en formato de roving y resina con carga. Luego se puede comenzar a laminar el interior del objeto con tela preimpregnada, para reducir un posible exceso de resina. Finalmente se vuelve a colocar arena dentro del objeto, con un film plástico entre medio para evitar que se pegue. La arena comprimirá las capas del compuesto, y reducirá el riesgo de separación.



Esquema de los pasos del proceso productivo.
Fuente: Elaboración propia

- ⑥ El paso final es dejar curar la pieza, según el tiempo requerido por la resina utilizada, para evitar futuras deformaciones que dañen la geometría del objeto. Como la cara externa de la pieza es la obtenida al momento de fabricar el formato laminar, si esta resultó de buena calidad, el objeto puede no necesitar acabado superficial. Pero si se desea se puede realizar este paso, dependiendo de la necesidad del fabricante.

Con los resultados obtenidos, se puede concluir que este proceso productivo es competitivo con respecto al proceso de laminado tradicional de materiales compuestos, en cuanto a la fabricación de series cortas. Tomando en cuenta el tiempo y costo necesarios para la fabricación de objetos con este proceso, que elimina la necesidad de fabricar moldes rígidos para cada pieza, se logra un resultado que puede ser aplicado en varios contextos, tanto objetos dinámicos sujetos a esfuerzos considerables como el carenado del Ackiu, como para objetos de una índole más estática. Si bien aún faltan pulir ciertos aspectos del proceso, los resultados son aceptables y rentables en un contexto donde los recursos para desarrollo y fabricación son acotados.



Esquema de los pasos del proceso productivo.
Fuente: Elaboración propia



Prototipo resultante del proceso productivo desarrollado.
Fuente: Elaboración propia

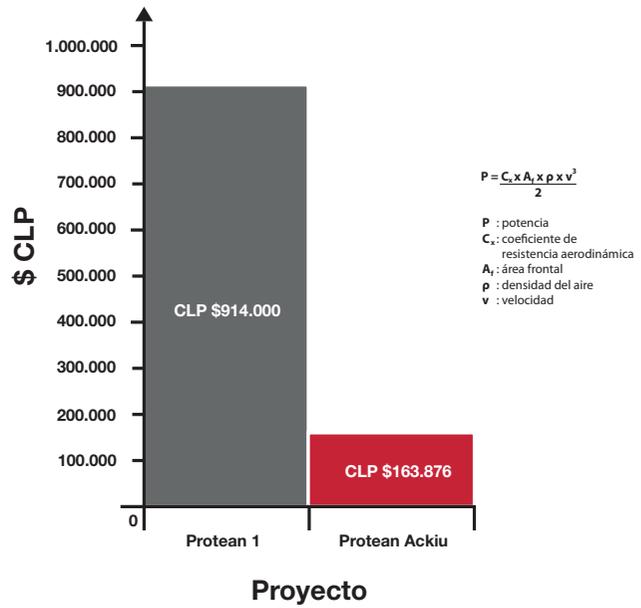


Gráfico comparativo de costo total, entre el carenado del Protean 1 y el carenado del Protean Ackiu.
 Fuente: Elaboración propia

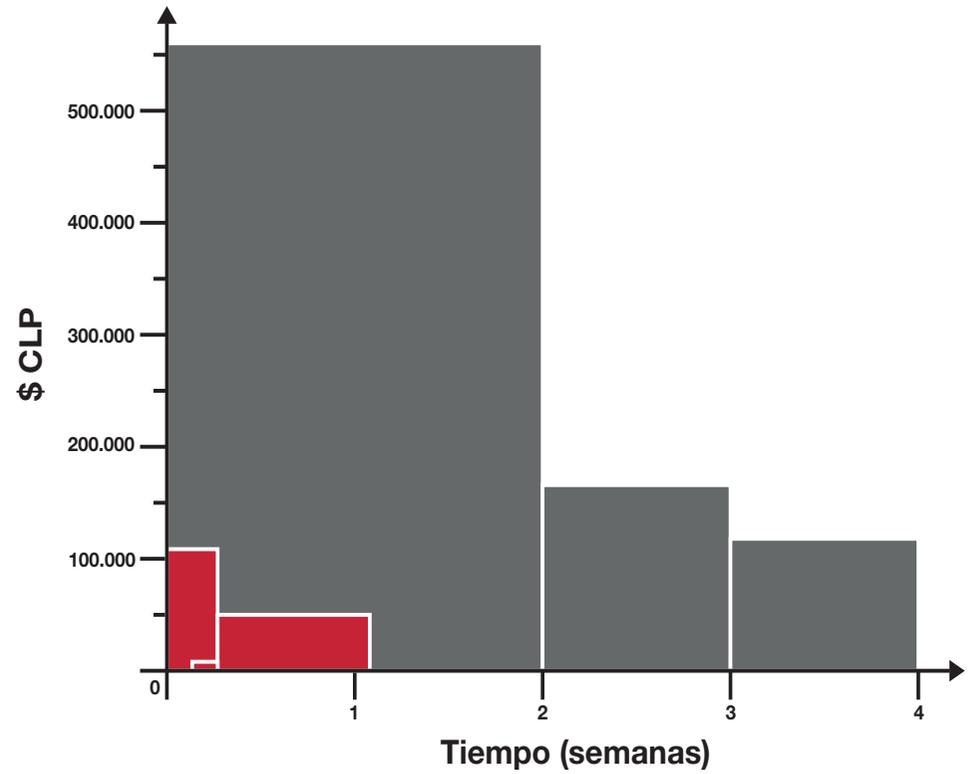


Gráfico comparativo de costo vs. tiempo de fabricación según etapas, entre el carenado del Protean 1 y el carenado del Protean Ackiu.
 Fuente: Elaboración propia

4. Conclusiones y aplicaciones

Con la optimización obtenida en el uso de recursos y tiempo de fabricación, relativa al proceso tradicional de laminado, el proceso obtenido podría ser catalogado como prototipado y/o manufactura rápida en materiales compuestos.

En cuanto a los contextos de aplicación, tal y como se explica en el planteamiento del proyecto, este proceso se hace relevante y competente en un ambiente donde no se dispongan los recursos necesarios para el uso de materiales compuestos, pensando en fabricación a baja escala o serie corta. Es por eso que en una instancia educacional y académica, como universidades, espacios maker y FabLab, se podría utilizar este proceso para la exploración de geometrías y conformación de volúmenes, que funcionen bajo las características y prestaciones de los materiales compuestos, como en el desarrollo del carenado del Protean Ackiu.

También podría aplicarse este proceso en un ambiente comercial de bajo capital, como emprendimientos, espacios o pequeñas empresas, donde las características del diseño paramétrico puedan entregar un universo morfológico que no necesita moldes ni matrices para la fabricación de objetos personalizables, que no necesiten moldes ni matrices para su conformación.

Cabe destacar que con esta investigación no se busca reemplazar el proceso de laminado sobre moldes, sino que poder hacer más asequibles los usos tan variados que pueden entregar los materiales compuestos, fomentando su utilización y posiblemente nuevos desarrollos tecnológicos en el área de procesos productivos.

4.1. Aplicaciones al diseño

Después de realizar esta investigación, se pudieron identificar posibles áreas de aplicación del proceso, en cuanto a la naturaleza de los productos obtenidos.

Elementos dinámicos:

Como el primer objeto fabricado con este proceso, el carenado del Protean Ackiu valida el uso de compuestos plegados en un contexto dinámico, donde debía soportar factores como flujo aerodinámico, cambios de temperatura, humedad y posibles golpes. Con la refinación del proceso en la segunda etapa de prototipado, con los datos obtenidos después de la carrera, se podría fabricar otro carenado que cumpla mejor su función y que corrija los errores y puntos críticos presentes en la carrera.

Elementos estáticos:

Otro uso de los resultados del proceso pueden ser objetos que estén sujetos a un menor estrés. En esta categoría pueden entrar objetos de carácter ornamental y decorativo, como por ejemplo, revestimientos interiores y pantallas de luminaria.

Otro uso de las pieles estructurales es como carcasa o contenedor. Gracias a las características de aislación eléctrica del compuesto de yute + epóxi, podría servir para fabricar carcasas poligonales para objetos electrónicos. También en el rubro del packaging puede tener cabida el plegado de compuesto, sirviendo como material alternativo al papel o cartón.

Elementos estructurales:

Sin duda una de las principales características de los materiales compuestos es su resistencia, resultante de la combinación de las propiedades de sus fases. Como una extrapolación de los prototipos 4 y 11, se podrían fabricar perfiles angulares a partir de este proceso, que puedan ser utilizados como elemento estructural. Uno de los posibles usos de estos perfiles sería el refuerzo de los bordes de los objetos fabricados con el mismo proceso, algo que podría reducir notablemente la deformación del compuesto.

4.2. Proyecciones / factores a profundizar:

En este proyecto de título se tuvo como meta lograr un proceso productivo que fuera comparativamente más económico y rápido que el método tradicional de laminado de FRP. Pero el tiempo de investigación fue una limitante para su desarrollo, por lo que no fue posible obtener un proceso productivo completamente terminado, debido a la gran cantidad de variables involucradas en la investigación y prototipado respectivo, sumado a los puntos críticos resultantes de ese proceso. De todas formas, se identifican los puntos que necesitan mayor profundidad para una futura investigación, que permita obtener el mayor potencial de este proceso productivo.

Uso de bioresinas:

Si bien el uso de biofibras es un gran avance en cuanto a sustentabilidad e innovación de materiales, la matriz polimérica de los materiales compuestos aún hace que su reciclaje sea difícil. Es por eso que sería ideal desarrollar un formato laminar completamente biodegradable, que cuente con una matriz polimérica capaz de ser desechada sin contaminar.

Mayor control de la deformación:

Uno de los mayores problemas encontrados en el proceso, es la deformación del volumen resultante. Esta se debe a varios factores, como la alta capacidad del yute de absorber humedad sumado al largo tiempo de post-curado de la resina.

Si bien se trató de corregir este punto, no pudo ser controlado totalmente, porque faltó tiempo de prototipado para resolverlo.

Corrección automática de plantillas:

El principal inconveniente en la herramienta digital de obtención de plantillas, es que estas se desarrollan sobre el plano unidas por las aristas del volumen de forma aleatoria. Esto resulta en plantillas de corte que quizás no son las mejores para optimizar el corte en el formato laminar de compuesto. Además, en algunos casos las caras desarrolladas del volumen se superponen al generar la plantilla. En ambos escenarios se deben corregir estos resultados a mano. Para corregir esto hay que modificar el algoritmo programado de la herramienta.

Pruebas mecánicas:

Con el fin de darle más validez al proceso desarrollado, se deben comparar ensayos mecánicos de volúmenes laminados tradicionalmente, versus volúmenes conformados por el plegado de compuesto.

Acabado superficial:

Los objetos fabricados con el proceso desarrollado y el proceso tradicional siguen utilizando los mismos materiales. Es por eso que en teoría no debería haber una diferencia en cuanto a la aplicación de un acabado superficial. En futuras aplicaciones del proceso, se podría incluir este paso para evaluar el aspecto resultante.

Explorar el uso de geometrías con curvatura simple:

Como las geometrías de curvaturas simples también son desarrolladas en un plano, se podría experimentar con la conformación de este tipo de formas para aumentar las posibilidades morfológicas de los resultados obtenidos con el proceso desarrollado.

Anexos

Costo carenado Protean 1

item	\$ CLP unitario	cantidad	\$ CLP total
Poliestireno expandido alta densidad x 15 planchas	12000	1	12000
Proceso router CNC (x hora)	25000	20	500000
Perfil tubular de acero 1" x 1,5 mm x 6 m	4200	1	4200
Cola 1 kg	10000	1	10000
Espuma de poliuretano	5000	1	5000
Lijas	280	50	14000
Masilla de poliéster	5500	1	5500
Masilla acrílica	5000	1	5000
Aparejo acrílico + diluyente	6600	1	6600
Cera desmoldante	7000	1	7000
Desmoldante PVA	5000	1	5000
Gelcoat x kg	12000	1	12000
Resina de poliéster x kg	6000	10	60000
Fibra MAT	5000	9	45000
Brochas	600	30	18000
Vasos de PP x 50 unidades	3100	2	6200
Guantes de latex x 50 pares	3500	3	10500
mascarillas	3500	8	28000
Overall	3500	4	14000
Fibra de yute tejida (producto donado al proyecto)	0	0	0
Fibra de vidrio tejida x metro lineal	6000	3	18000
Resina epóxica Mepox 1685 x kg	23000	4	92000
Klegecell (espuma estructural de PVC) 3mm	15000	1	15000
Peel ply (tela oxford) x m	800	6	4800
Napa x m	1200	6	7200
Polietileno (bolsa de vacío) x m	1500	6	9000
TOTAL			914000

Costo carenado Protean Ackiu

item	\$ unitario	cantidad	\$ total
Fibra de yute tejida x metro lineal	1280	1.7	2176
Cabo de yute	1500	1	1500
Resina epóxica Mepox 1685 x kg	23000	3	69000
Pegamento epoxi 5 min	12000	4	48000
Cera desmoldante	7000	1	7000
Desmoldante PVA	5000	1	5000
Brochas	600	4	2400
Vasos de PP x 50 unidades	3100	1	3100
Guantes de latex x 50 pares	3500	2	7000
mascarillas	3500	1	3500
Overall	3500	1	3500
Peel ply (tela oxford) x m	800	3	2400
Napa x m	1200	3	3600
Polietileno (bolsa de vacío) x m	1500	3	4500
Plotter	1200	1	1200
TOTAL			163876

Bibliografía

2009, A. I. (Septiembre de 2009). ¿Por qué naturales? Cinco buenas razones...
Obtenido de <http://www.naturalfibres2009.org/es/aifn/index.html>

Altamirano, J. (4 de Julio de 2013). AERODINÁMICA DE AUTOS. Obtenido de
<http://rjose1994.blogspot.cl/2013/07/aerodinamica-de-autos.html>

Ashby, M. F. (2013). *Materials and the environment*. Waltham: Elsevier.

Donoso, P. C. (2013). Fibras vegetales utilizadas como refuerzo de compuestos FRP termoestables: desarrollo de carenado y panelería estructural. Santiago:

Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Chile.

Espinoza, M. (2015). Informe de práctica Protean. Santiago.

FAU, U. d. (s.f.). Laboratorio CNC. Obtenido de http://uad.uchilefau.cl/?page_id=101

Groover, M. P. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna*. DF. Mexico: MC Graw Hil.

Hallgrimsson, B. (2013). *Diseño de producto: maquetas y prototipos*. Barcelona: Promopress.

Hernandez, J. (29 de Noviembre de 2012). Diseño generativo/parametrico. Obtenido de H2lab: <https://hdoslab.wordpress.com/2012/11/29/disenogenerativoparametrico/>

Hull, D. (2003). *Materiales compuestos*. Barcelona: Reverté, S.A.

Jodar, J. O. (2001). *Estudio aerodinámico aplicado en el campo de la automoción*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.

Lab, J. (s.f.). Jute Lab. Obtenido de <http://jute-lab.org/project-brief/#p-o>

Laguna, S. M. (9 de Agosto de 2011). El diseño generativo. Obtenido de <https://vortica.wordpress.com/2011/08/09/el-diseno-generativo/>

Lalit Narayan, K., Mallikarjuna Rao, K., & Sarcar, M. (2008). *Computer aided design and manufacturing*. New Delhi: Prentice-Hall of India Private Limited.

Leão, L. (23 de Mayo de 2016). CAD vs CAE vs CAM: ¿Cuáles son las diferencias? Obtenido de <http://www.cim-team.com.br/blog-de-ingeneria-electrica-moderna/cad-vs-cae-vs-cam-diferencias>

Molinare, A. (9 de Noviembre de 2011). ¿Qué es el diseño paramétrico? Obtenido de <http://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-118243/%25c2%25bfque-es-el-diseno-parametrico>

Moreno, I. E. (29 de 09 de 2003). Control numérico computarizado CNC. Diseño y manufactura asistidos por computadora. Obtenido de gestiopolis: <http://www.gestiopolis.com/control-numerico-computarizado-diseno-manufactura-asistidos-computadora/>

Solar, O. L. (2011). Carrera Solar Atacama. Obtenido de <http://www.carrerasolar.com/c/carrera-solar/desafio-2016>

Ulrich, K. T., & Eppinger, S. D. (2013). *Diseño y desarrollo de productos*. México, D.F.: McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A.



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE ARQUITECTURA Y URBANISMO

Departamento de Diseño

Proyecto de Título Diseño Industrial

Semestre Otoño 2016