

dense



ESCUELA DE DISEÑO
FACULTAD DE ARQUITECTURA, DISEÑO
Y ESTUDIOS URBANOS

delensse

Santiago, Chile

Vicente Carmona Montedónico

Agosto 2023

profesor guía:
Héctor Novoa



dedicado a mi abuelo,
por acercarme al encanto de las cosas

dedicado a mi abuela,
por enseñarme lo que es el cariño

agradezco a mi familia y amigos,
por su presencia y permanencia

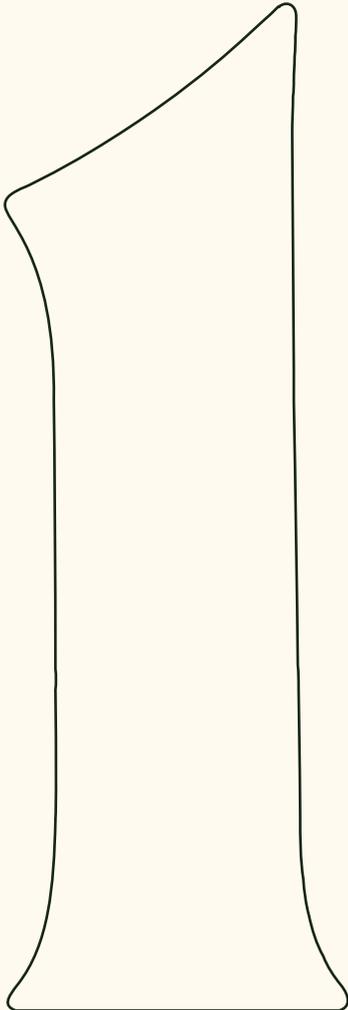
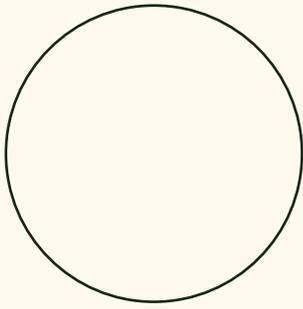
Siempre me ha gustado armar cosas, manipular artefactos y sensibilizarme con el mundo de lo tangible.

Un año atrás lo único que sabía era que el proyecto de título no podía desviarme de este camino.

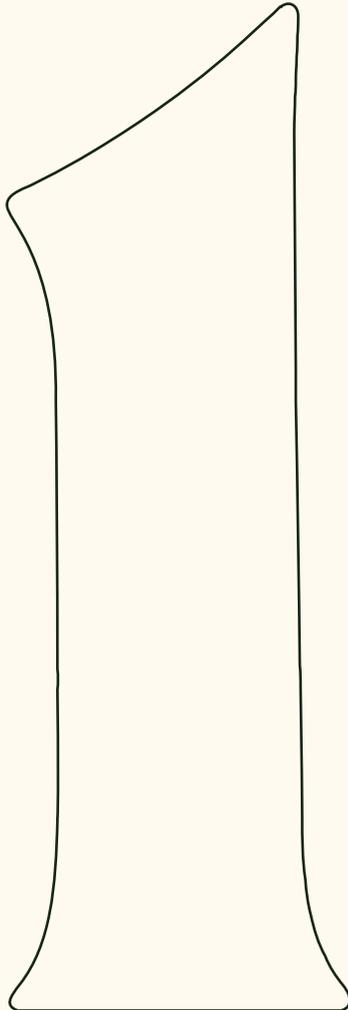
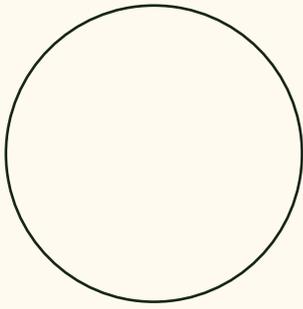
Estoy agradecido de haberlo seguido y que cada paso fuera una oportunidad de crear y manipular todo tipo de herramientas, materiales y formas.

A continuación,
se detallan estos pasos,

espero se pueda entrever la
afición con que se dio
cada uno.

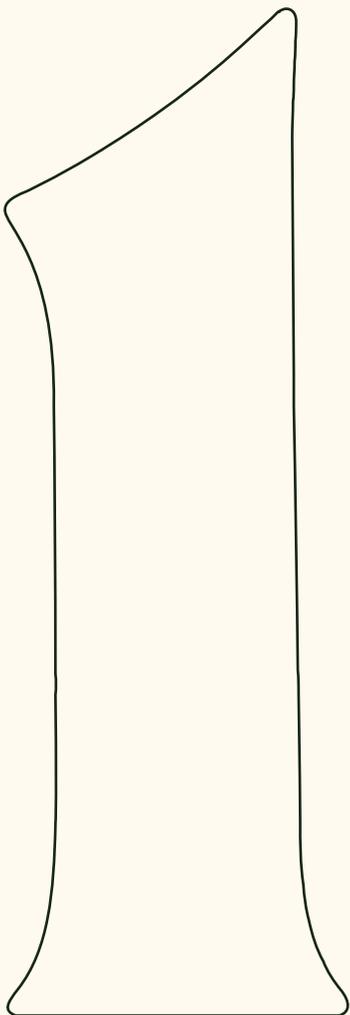
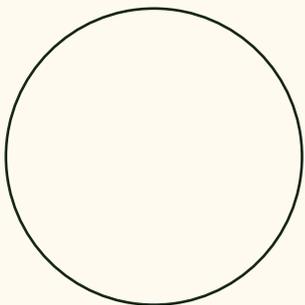


Planteamiento del Problema	i
Marco Teórico	6
<i>Madera:</i>	
Etimología e Historia	8
Protagonista de un Futuro Sostenible	9
Relevancia en el Marco Nacional	10
Madera y Mueble en Chile: Entrevista Vicente Stephens	14
<i>Madera Densificada</i>	
¿Qué es?	17
Historia	19
Problemas	20
Densificación termo-hidro-mecánica	25
Desempeño Mecánico	26
Relevancia Contemporánea	28
Formulación del Proyecto	
<i>Oportunidades</i>	
Mueble y Fijación	32
Pertinencia Personal	33
¿Qué?, ¿Por qué?, ¿Para qué?	34
Objetivo General	35
Objetivos Específicos	36
<i>Semiótica de la Madera</i>	
Contexto y Relevancia para el Proyecto	37
Referentes del Proyecto	
<i>Densificación</i>	
EPFL+ECAL Lab - Under Pressure	39
Sonowood	43
<i>Técnica, Historia y Forma</i>	
Christian Borger - Ultralight	45
Eames Plywood LCW Lounge Chair	47



Desarrollo del Proyecto

<i>Primera Aproximación</i>	
Densificación Inicial	51
<i>Instrumentos para Densificar</i>	
Abordando el Desafío	57
Conceptualización - Plataforma de Densificación	59
Decisiones de Diseño - Plataforma de Densificación	62
Problemas - Plataforma de Densificación	66
Conceptualización - Plataforma de Plastificación	68
Pivoteo - Plataforma de Plastificación	71
Interacción y Flujo entre Plataformas	74
<i>Primeros Resultados</i>	
Experiencia Práctica	80
<i>Ensayos Prácticos</i>	
Densificación Laminar	83
Terminación	85
Humedad - Inmersión Total	87
Humedad - Inmersión Parcial	89
<i>Caracterización Material</i>	
Estética del Pino Radiata Densificado	91
<i>Ensayos Mecánicos</i>	
Objetivos y Laboratorio DIMM PUC	96
Resultados y Reflexión Crítica	99
<i>Aproximación al Diseño de Mobiliario</i>	
Conceptualización	103
<i>Diseño de la Propuesta</i>	
Objetivos y Desarrollo Conceptual	105
Maqueta	108
Iteraciones y Pruebas de Ensamble	110
<i>Manufactura de la Propuesta</i>	
Desafíos y Aprendizaje	113
<i>La Propuesta</i>	
Usabilidad y Desempeño	118
<i>Futuras Iteraciones</i>	
D01 y Productos en Madera Densificada	122
<i>Fijación Mecánica</i>	
Hinchazón de la Madera y Lógica Tarugo	124



<i>Identidad Gráfica</i>	
Aproximaciones al Diseño de Marca	126
Fuentes Tipográficas	127
Paleta Cromática	128
Recursos Complementarios	129
<i>Costos</i>	
Desglose y Reflexión	130
<i>Proyecciones</i>	
Continuidad y Contacto	131
<i>Conclusiones</i>	
Resultados y Aprendizaje	132
<i>Bibliografía</i>	134
<i>Anexo</i>	
Informe de Ensayos DIMM PUC	136
Transcripción Entrevista Vicente Stephens, DALCA	137

P

Planteamiento
del Problema

problema

Existe un encanto en nuestra relación con la madera, y es que mucho antes de que el ser humano comenzara a trabajar este material para transformarlo en estructura y herramienta, la madera nos transformó a nosotros, informando la evolución de nuestra anatomía a través de primates ancestrales cuyas adaptaciones repondieron a habitar los árboles (Ennos, 2020), comer, transportarse y vivir en constante interacción con una materia que millones de años después ha sido domesticada, usada y reemplazada, pero mantiene una fuerza gravitacional evidente e ineludible.





La industria inmobiliaria es el sector que goza de un mayor ritmo de innovación en madera. La buena salud de la industria maderera acelera cambios dinámicos, con la creciente conciencia de la gobernanza medioambiental y social (ESG) que tiene la industria, empresas grandes y pequeñas apuntan a invertir en crecimiento e innovación (Borrit, 2021).

El carácter sustentable e innovación de la industria se debe entre otras cosas a especies de madera de rápido crecimiento que habilitan la escala y oferta sostenible del producto. En Chile el pino radiata representa el 55,5% de toda la superficie de plantaciones forestales, seguido por un 37,1% de especies de eucalipto (INFOR, 2022), ambas maderas de alto rendimiento entre las cuales el pino radiata representa el corazón de la oferta maderera del país, conformando desde madera dimensionada y tableros, hasta productos de ingeniería como CLT.

Aún así el pino radiata, por sus características físico-mecánicas, es rara vez la opción ideal para mueblería de alta gama y aplicaciones de interacción directa, se prefieren maderas nativas como Coigüe o Lenga. Incluso la silla Valdés, uno de los ejemplares más reconocidos de mueblería chilena, debe recurrir a maderas tropicales como la Teca para lograr estructurar la propuesta, lo cual no representa una alternativa sustentable ni responde al contexto local.



La madera es un material atractivo desde sus atributos estéticos y sensoriales, hasta la oportunidad que representa como un material sustentable y duradero. Aún así, su presencia en lo cotidiano ha sido reemplazada por materiales que parecen más propios de la vida moderna, acero, concreto y polímeros sintéticos conforman la mayor parte de nuestro mundo construido y los productos que consumimos, visualizaciones de la vida futura suelen mostrar urbes brillantes de acero y vidrio, ciudades con rascacielos y geometrías fluidas, pareciera que la madera no es lo que asociamos con nuestro futuro (UNECE, 2016).

La madera ocupa un segundo lugar como alternativa para confeccionar los bienes de nuestra sociedad, percibida como un elemento del pasado cuyo uso se justifica sólo para efectos de nostalgia y narrativas rústicas. Pero los desafíos ecosistémicos del presente y el avance tecnológico que lo representa otorga una nueva mirada a la madera, que se posiciona como una alternativa sustentable y económicamente viable, que mediante innovación material responde efectivamente a las necesidades y condiciones para crear en el siglo XXI (Stühlinger, s.f.).



Conviene devolver la mirada al pino radiata y a maderas blandas de alto rendimiento desde la innovación, ya que son estas las especies capaces de sostener el futuro y escala de nuestro mundo construido sin amenazar y contribuir a la tala de bosque nativo y uso ineficiente de los recursos.

El sector forestal puede y debe llevar una transición hacia un uso más eficiente y circular de biomateriales con mayor valor agregado (FAO, 2022), y por qué no comenzar por el material más cercano, económico y omnipresente, el pino radiata.

Puente de madera en *Highline*, Nueva York. Deezen, 2023.

Marco
Teórico

Existe una avenida de innovación que promete dotar a la madera de todos aquellos desempeños mecánicos necesarios para la mueblería y diversas aplicaciones más.

La madera densificada, es una madera de ingeniería cuya primera evidencia data de más de 100.000 años de antigüedad (Sandberg et al., 2021), aun así, es un proceso desconocido ante el público general y cuyas aplicaciones se encuentran recluidas tras las puertas de la industria. La densificación de madera y su potencial para agregar valor al pino radiata están al centro de este proyecto.

Aun así, resulta necesario revisar en profundidad no solo la madera densificada, sino también la madera en general y la industria que la soporta en Chile.



Madera

Etimología e Historia

Madera en español proviene del latín materia, es tanto un material para construir y hacer, como un elemento imprescindible para nuestra vida en la tierra. Servirnos de la madera ha sido clave para nuestro éxito como especie, nos permitió bajar de los árboles y ser primeros en la pirámide trófica, para luego ser el vehículo de nuestra colonización de los continentes (Ennos, 2020).

Lentamente comenzó a ser reemplazada, primero como combustible y luego como material para estructurar nuestra sociedad, el siglo XIX vio el reemplazo de la madera en estructuras de gran escala a manos del acero y el concreto, mientras que el siglo XX vio el reemplazo de la madera en aplicaciones de pequeña escala mediante la masificación del plástico (Ennos, 2020). La evolución material de nuestro entorno parece no dejar lugar para la madera, pero el mismo avance tecnológico que nos llevó a abandonarla, puede y debe hacerse cargo de traerla adelante nuevamente en un siglo donde lo relevante no es solamente crecer, sino que sostener una calidad de vida y un medio ambiente cada vez más amenazado.

Madera

Protagonista de un Futuro Sustentable

La madera es una alternativa renovable y sostenible que debe ser reincorporada a nuestras lógicas constructivas tanto en gran como mediana escala. La variedad de acuerdos y metas que establece la comunidad internacional se intersecan con el potencial de la madera. Objetivos 9 (Industria Innovación e Infraestructura) y 13 (Acción Climática) de los objetivos de desarrollo sostenible (SDG) planteados por las Naciones Unidas (2015) guardan relación directa con la necesidad de innovar en madera. Un reporte de proyecciones del mercado forestal indica que **“la forma más eficiente de cortar emisiones y reducir el consumo energético es reemplazar el acero, concreto y aluminio con madera”** (Gresham House, 2020, p. 27).

Por encima de la energía cobrada en crecer, talar y procesar madera, esta absorbe 1.700 kilos de CO₂ de la atmósfera por tonelada producida, versus el concreto, acero y aluminio que liberan 159, 1.240 y 9.300 kilos de CO₂ respectivamente durante la producción de una tonelada del material. La capacidad de offset que presenta la madera mediante fotosíntesis a lo largo de su vida no es sólo valiosa para el material y la industria que lo sustenta, sino que también genera créditos de carbono para normalizar las emisiones inevitables de otros sectores. Industrias como la aviación ya han puesto en funcionamiento políticas que buscan el offset terciario de sus emisiones como el esquema CORSIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation) llevado adelante por la Organización Internacional de Aviación Civil.

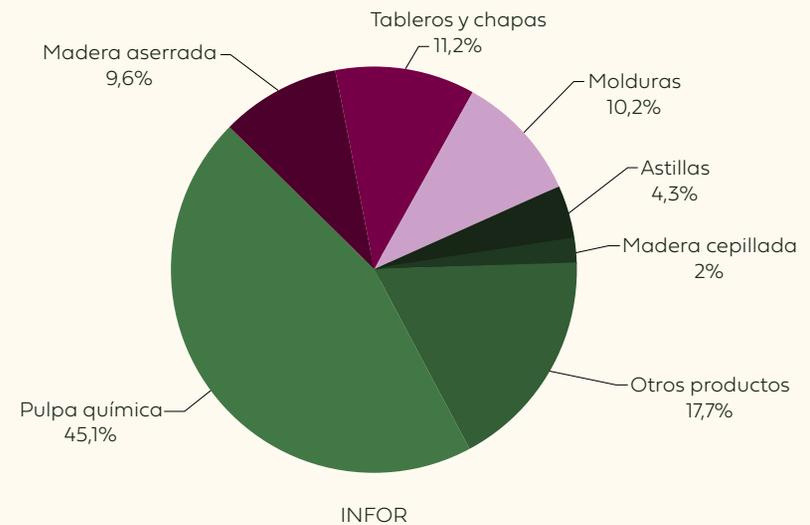
Así es como este anticuado material se entaña con los problemas y oportunidades de nuestro futuro, con expectativas de crecimiento en su consumo de un 3.1% anual en el mundo, liderado por la urbanización, descarbonización y el crecimiento de la construcción residencial (Gresham House, 2022).

Madera

Relevancia en el Marco Nacional

En Chile la industria forestal representa el 1.7% del PIB nacional y aporta cerca de 300.000 empleos a lo largo del país. Aun así, la especialización de la industria es baja, las principales exportaciones son materia prima como pulpa química (45.1%) y madera aserrada (9.6%), mientras que se importan bienes madereros de mayor valor agregado como papel, muebles de madera y tableros. Las importaciones de muebles de madera conforman el 18.4% del total de productos forestales importados en 2021 con un valor cercano a 350 millones de dólares, provenientes principalmente de China y Brasil (INFOR, 2022). Se evidencia un mercado capaz de reunir alto valor agregado e innovación que la industria nacional actual no explota o satisface plenamente.

Principales Productos Forestales exportados en 2021
Total: US\$5/969,4 millones FOB





Madera

Relevancia en el Marco Nacional

Resulta importante que un país con alta experiencia forestal como Chile sea capaz de trabajar su oferta con inteligencia e innovación, diversas organizaciones y esfuerzos del último tiempo lo confirman. Sin ir más lejos agrupaciones como el Centro UC de Innovación en Madera y eventos tales como la Semana de la Madera organizada por CORMA sostienen e invitan a innovar en torno a este material en el contexto nacional.

Innovar en madera en torno al mueble y aplicaciones de menor dimensión o escala es también un desafío importante y necesario ya que a diferencia del foco que generalmente goza el sector inmobiliario, la madera aplicada a mueblería permite abordar las bondades del material con mayor especificidad y libertad formal, integrando un mayor número de aristas y canales de diseño.

Férula para pierna: innovación en madera moldeada ante las vibraciones perjudiciales producidas por férulas de metal durante la segunda guerra mundial. *Charles y Ray Eames, 1942.*

marco teórico

Madera

Relevancia en el Marco Nacional

Aun así, la innovación en madera debe ser acompañada de una adecuada administración forestal. En Chile actualmente si bien el pino radiata logra tener buen rendimiento y sostener la oferta maderera del país, el monocultivo y tala rasa de esta especie ha sido altamente nociva para el medio ambiente. Impactando en términos de erosión de los suelos, disponibilidad hídrica, disminución de la biodiversidad, favorecimiento de la propagación de incendios y ámbitos socioambientales (Salinas, 2020).

Si bien el impacto ambiental a gran escala de la industria forestal en Chile y el mundo no representa el foco de este proyecto, es necesario comprender esta dimensión y reconocer la necesidad de un cambio e innovación simultánea en tanto el espectro de productos de ingeniería en madera, tema en que se enmarca el proyecto, como también la industria macro que lo sustenta.



Madera y Mueble en Chile

Entrevista Vicente Stephens, DALCA

Para profundizar en el escenario del mueble de madera en Chile se entrevistó a Vicente Stephens, diseñador industrial de la Universidad Diego Portales y fundador de Dalca Muebles, empresa chilena dedicada al diseño y fabricación de muebles en madera.

Un hallazgo protagónico de la entrevista fue que en la práctica prefiere la utilización de maderas importadas como el roble americano, fresno, nogal y haya versus maderas de producción nacional ya que en términos de precio es competitivo y puede asegurar una mejor calidad del producto, ya que, de acuerdo a sus comentarios, en Chile los formatos de madera resultan sumamente mínimos y por tanto incómodos de trabajar, además de que no existe un proceso cuidadoso de secado a diferencia de la madera importada. Por lo que en términos del modelo de negocios que debe sostener, prefiere importar materia prima de calidad que garantice la estabilidad del producto a largo plazo, por sobre apostar a la madera nacional.

Sitial D01, Dalca Furniture.

Madera y Mueble en Chile

Entrevista Vicente Stephens, DALCA

El pino radiata, aun con su alta disponibilidad, es una madera que evita debido a que su desempeño mecánico no puede asegurar la durabilidad del producto y por tanto no se acopla con la oferta de valor de Dalca. Ante lo cual se prefieren otras especies de pino como el abeto canadiense que da mejores resultados.



Comencé con madera nacional, era lo que más quería, trabajé con mucho castaño, lenga, raulí. Pero, también muchas veces el cliente pedía -es que quiero que se vea como esta madera-. Es un gran desafío encontrar eso en la oferta nacional, sumando temas de la calidad final del mueble, posventa y secado de la madera, al final, el mercado me fue llevando a la madera importada. Hoy ya es parte del modelo de negocios y tiene que ser madera así.

Madera y Mueble en Chile

Entrevista Vicente Stephens, DALCA

En torno al mercado disponible para una empresa como Dalca, cuya oferta principal son sillas de madera y propuesta de valor situada en el diseño y manufactura del producto, Vicente indicó que el principal cliente y mayor volumen de venta es a empresas tales como hoteles, restaurantes, universidades y oficinas que si bien son buenos clientes por el volumen que demandan, también pone presión por sobre el producto que debe ser resistente al alto tráfico de estos espacios semi públicos.



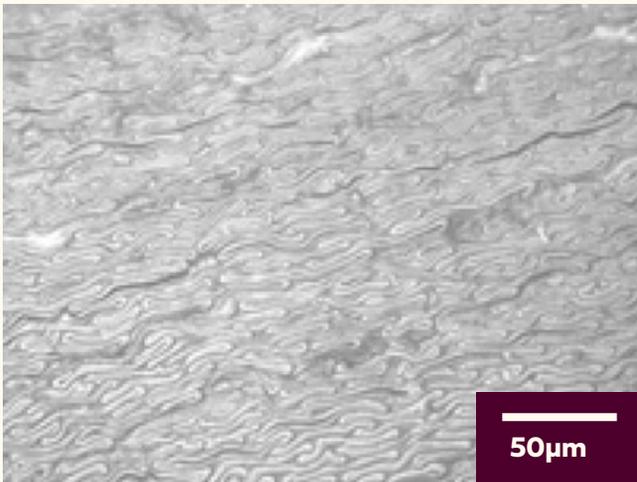
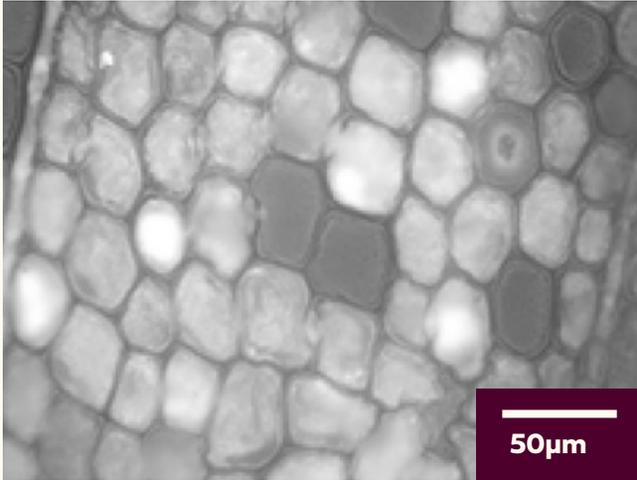
Debido a la alta competencia, especialmente ante importaciones, es importante estar siempre innovando. Nosotros estamos haciendo esta parte innovación con la carpintería digital, pero creemos que igual esto no es lo único, y el día de mañana será necesario algo más por lo que constantemente estamos buscando desarrollos.

Debes que estar constantemente desarrollando ideas nuevas, uniones nuevas, nuevas formas de ver la madera, es algo muy interesante.

Madera Densificada

¿Qué es?

La densificación de madera es un proceso a través del cual la densidad de la madera es incrementada por compresión de las células en dirección transversal para reducir el volumen vacío de los lúmenes (THM), por impregnación de la pared o lumen celular con una resina sintética (chemical bulking), o por combinación de ambos procesos. El propósito de la densificación es mejorar la dureza, resistencia a la abrasión y fuerza de la madera, además, la compresión transversal puede también facilitar la curvabilidad transversal en moldeo de madera (Sandberg et al., 2021).



Imágenes de microscopía óptica Abeto de Douglas no densificado (arriba) y densificado (abajo). (Sotayo, et al., 2019).

En la imagen inferior se puede observar el colapso del lumen celular de forma que se reduce/elimina el vacío entre las paredes. Esto corresponde a densificación por reducción de volumen.



Lanza Clacton, lanza de aproximadamente 420.000 años de antigüedad descubierta en Inglaterra. Museo de Historia Natural, Londres.

Lanza referenciada en texto corresponde a la Lanza Lehringer, descubierta en el pueblo de su nombre en Alemania, cuya punta fue endurecida con fuego. *-sin foto-*

Madera Densificada

Historia

El concepto que precede la madera densificada, comprimir el material en búsqueda de un rendimiento físico mecánico elevado, tiene evidencia de más de 100.000 años de antigüedad en una lanza de madera cuya punta fue endurecida por calor y encontrada enterrada al interior del esqueleto de un elefante.

El proceso y material, si bien resulta novedoso en el marco general de productos forestales, tiene patentes industriales de principios del siglo XX y diversas marcas comerciales, muchas todavía presentes. Lignostone™ es el primer producto de madera densificada de producción industrial cuya patente fue ingresada en 1915, producto que se comercializa hasta el día de hoy (Sandberg et al., 2021).



Madera Densificada

Problemas

El principal problema asociado con la densificación de madera es el springback y set-recovery, ambos se refieren a la hinchazón que sufre la madera luego del proceso de densificación. El primero describe la respuesta elástica inmediata que sufre la madera una vez removida la fijación mecánica, mientras que el set-recovery describe la hinchazón y tendencia a volver al volumen original de la madera ante cambios en humedad relativa.

Para hacer frente a estos problemas y asegurar estabilidad dimensional del producto, versiones comerciales de la madera densificada son, en su gran mayoría, del tipo impregnado con resina o chemical bulking, método que enfrenta serios problemas en torno a la sostenibilidad del proceso y por tanto legitimidad en un futuro que demanda soluciones sustentables.

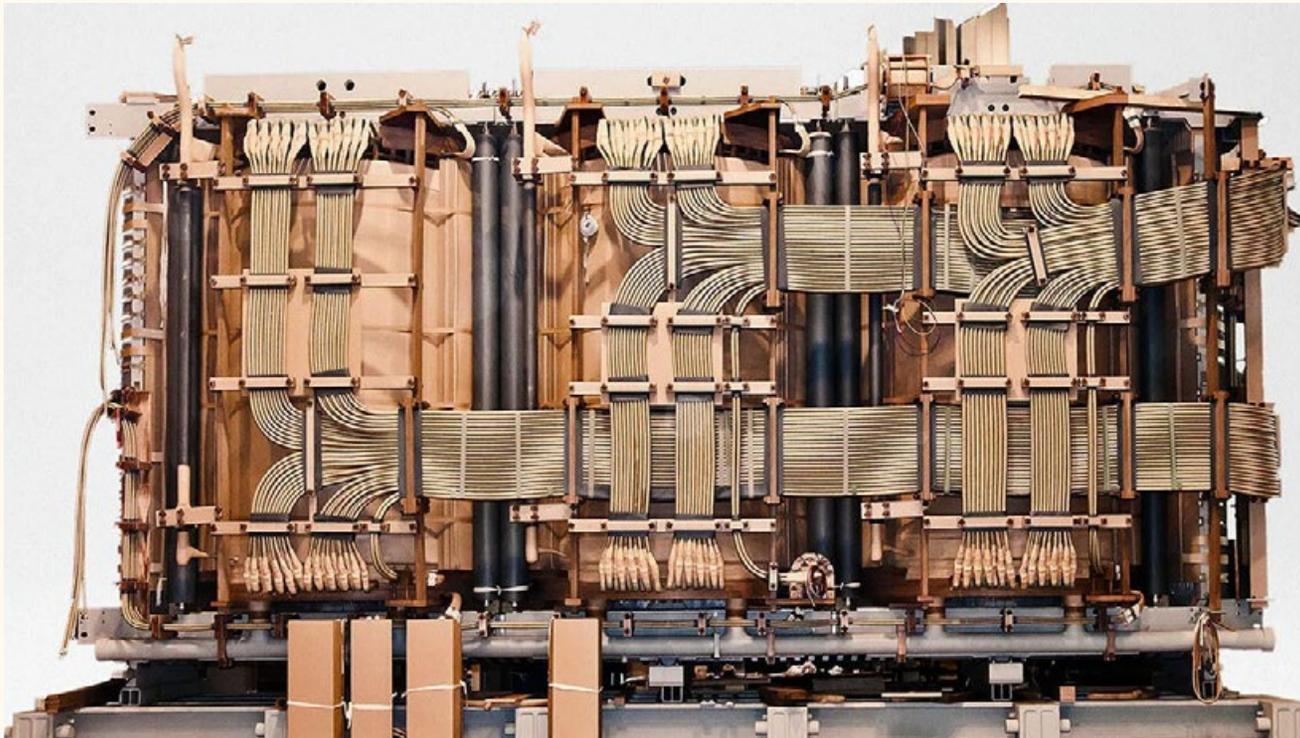


Los usos típicos del material impregnado son contenedores de gas natural líquido, placas de desgaste, barreras antibalas, componentes de transformadores eléctricos, carcasas de componentes de audio, entre otros (Neyses, 2019). Dimensiones de uso que evidencian la escasa notoriedad pública del material y al mismo tiempo no integran el esquema completo de posibilidades que otorga la madera densificada y los procesos involucrados en su producción. Una mirada desde el diseño de producto esgrime un abanico de posibilidades de uso con mayor inteligencia y trabajo formal.

Röchling Lignostone®, madera densificada a través de impregnación con resina. Utilizada para aislamiento de tanques de gas natural a temperaturas extremas.



Hasta el momento estos productos de madera densificada nunca se han alzado por sobre el carácter de producto caro y de nicho, usualmente para aplicaciones muy específicas, probablemente debido a tres limitaciones: la necesidad de un sistema cerrado, amplia cantidad de sustancia de impregnación y largos tiempos de procesamiento. (Neyses, 2019, p. 38)



Transformador eléctrico construido a base de Lignostone® Transformerwood® que otorga aislación térmica y resistencia a temperatura.

Procesos termo-hidro-mecánicos (THM) de densificación evitan el paradigma complejo de la impregnación, pero al mismo tiempo se enfrentan a mayores problemas de estabilidad dimensional y escalabilidad industrial, hasta el 2019 ningún proceso de densificación de madera distinto a la impregnación ha sido exitosamente introducido en gran escala industrial. Es el argumento doctoral de Neyses (2019) la existencia de una brecha de investigación en torno a procesos industriales, históricamente el foco se ha puesto sobre propiedades mecánicas del material, morfología, set recovery, entre otros. Mientras que el escenario de industrialización a escala del producto es complejo e insuficiente.



La principal razón que explica la falta de producción en masa de productos de madera densificada superficialmente guarda relación con la velocidad de los procesos y su complejidad, especialmente cuando se trata de reducir el set-recovery sin aditivos tales como resina. (Neyses, 2019, p. 97)

Madera Densificada

Áreas de Investigación

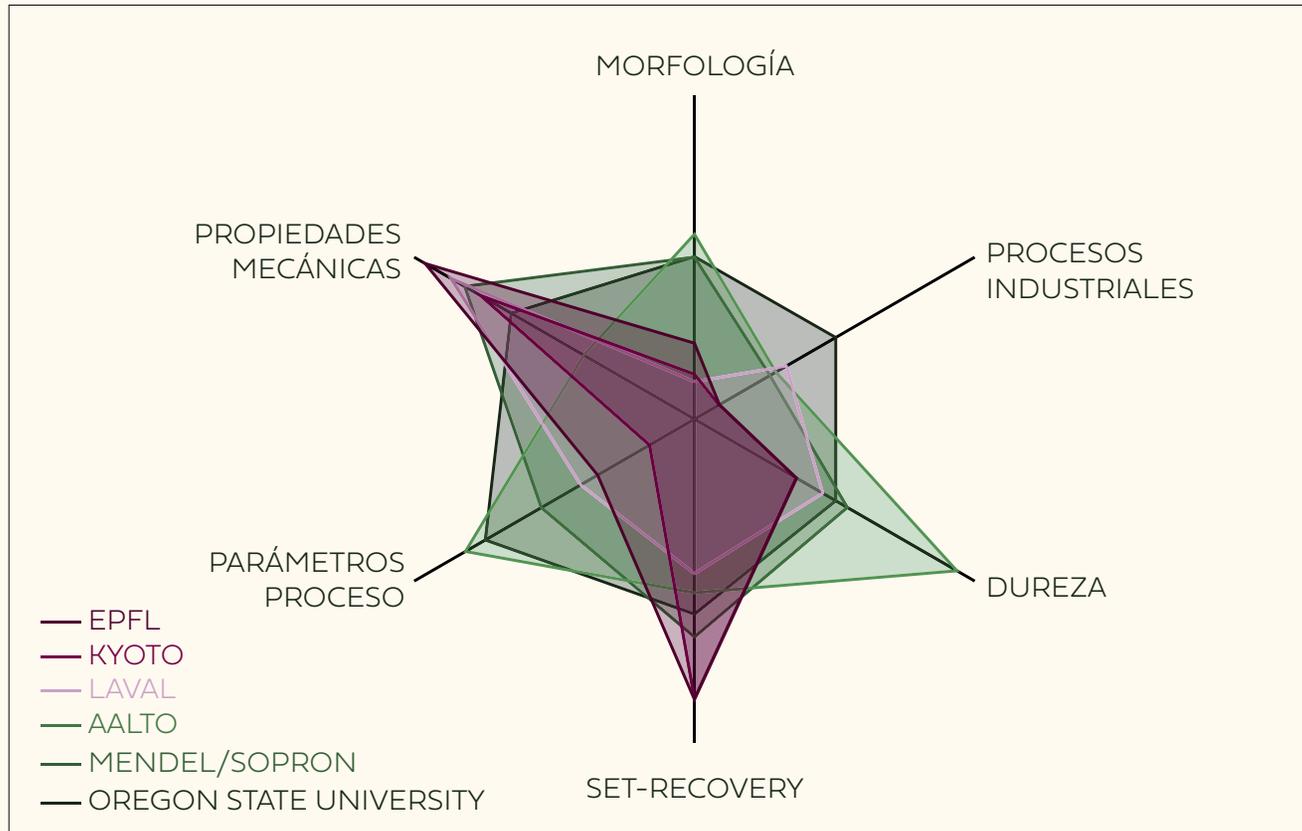
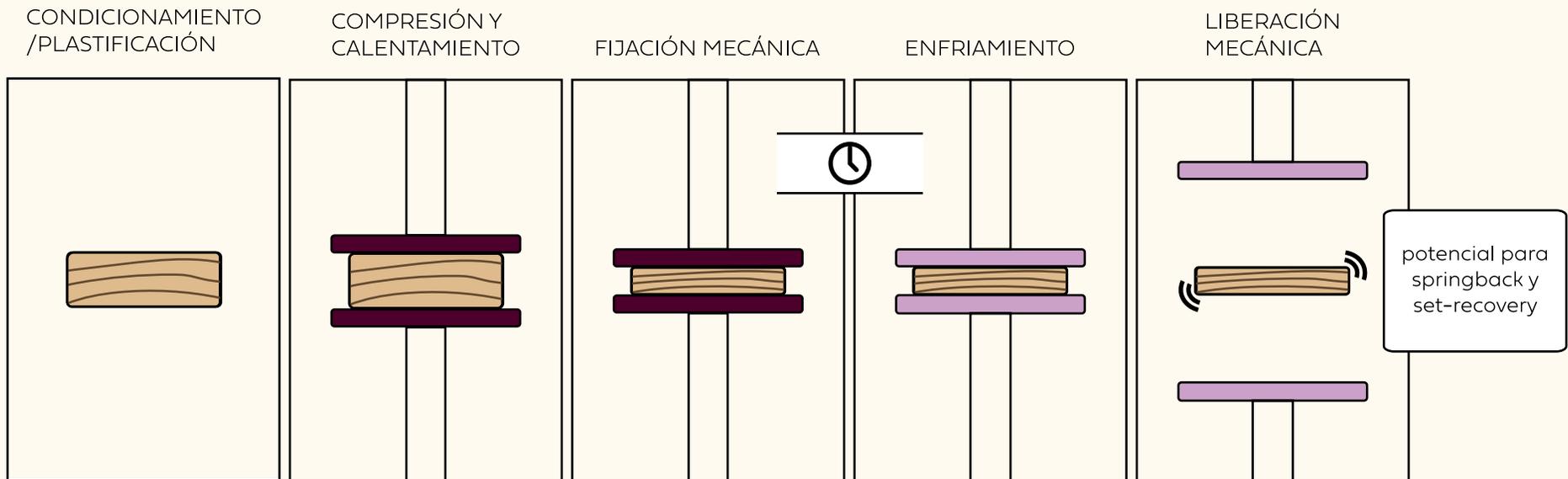


Gráfico polar que describe las áreas de investigación en torno a la madera densificada. (Neyses, 2019).

Demuestra la aproximación científica a la madera densificada que ignora ampliamente el potencial de aplicaciones del material y sugiere un vacío de desarrollo en torno a la morfología y trabajo práctico.

Madera Densificada

Densificación termo-hidro-mecánica



Gráfica esquemática que describe las etapas del proceso de densificación termo-hidro-mecánico.

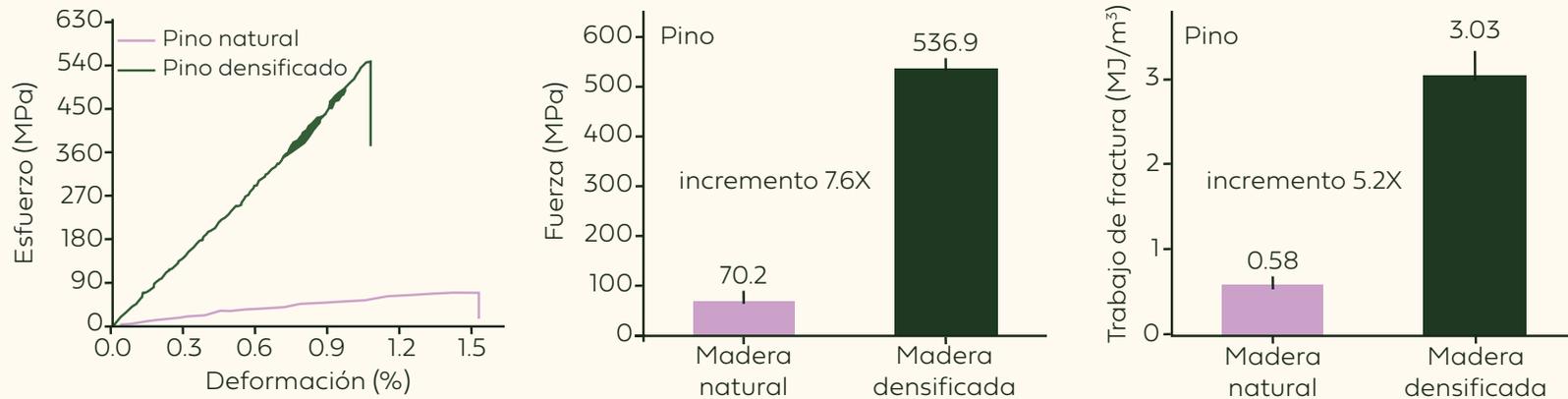
Este proceso densifica la madera a través de la reducción del vacío interno versus procesos que impregnan la madera para aumentar su densidad. Es el sistema que se desarrollará en el proyecto por su carácter sustentable y relativa simpleza.

Madera Densificada

Desempeño Mecánico

La evolución de las propiedades mecánicas de la madera densificada depende principalmente del índice de compresión a la que cada pieza fue sometida, la tendencia general indica una correlación positiva entre la compresión y el posterior desempeño mecánico, es decir, ante un mayor porcentaje de compresión, mejores son las propiedades estructurales de la madera. Aun así se debe cuidar la compresión extrema (>80%) ya que puede resultar en la fractura de la pared celular y por tanto un detrimento a las propiedades mecánicas originales. La densificación impacta positivamente en variedad de pruebas: esfuerzo de tensión, esfuerzo de tracción, dureza, módulo de elasticidad, módulo de ruptura, resistencia a impacto, entre otros. El conflicto general en ingeniería de materiales entre fuerza y tenacidad no es tal cuando se trata de madera densificada, ya que un amplio incremento en resistencia a la tracción no es acompañado por una disminución en tenacidad, es decir que el material no se vuelve más frágil a medida que aumenta su rigidez y fuerza (Song et al., 2018).

La densificación de madera con remoción de lignina, llevado a cabo por Song et al. (2018), otorgó mediciones de resistencia a la tracción 11.5 veces mayor a su contraparte original, módulo de ruptura 6 y 18 veces mayor a través y perpendicular a la dirección de crecimiento respectivamente, módulo de dureza desde 13 veces mayor al de madera natural, entre otros. Las propiedades mecánicas de la madera densificada no son solamente notablemente superiores a la madera en estado natural, sino que también exceden las cualidades de muchos materiales estructurales ampliamente usados, describe Song et al. (2018) ante los resultados de sus pruebas de laboratorio.



Curva de esfuerzo-deformación y comparaciones de fuerza entre pino natural y densificado. (Song et al., 2018).

Pone en evidencia el potencial de evolución mecánica de la madera a través de la densificación.

Madera Densificada

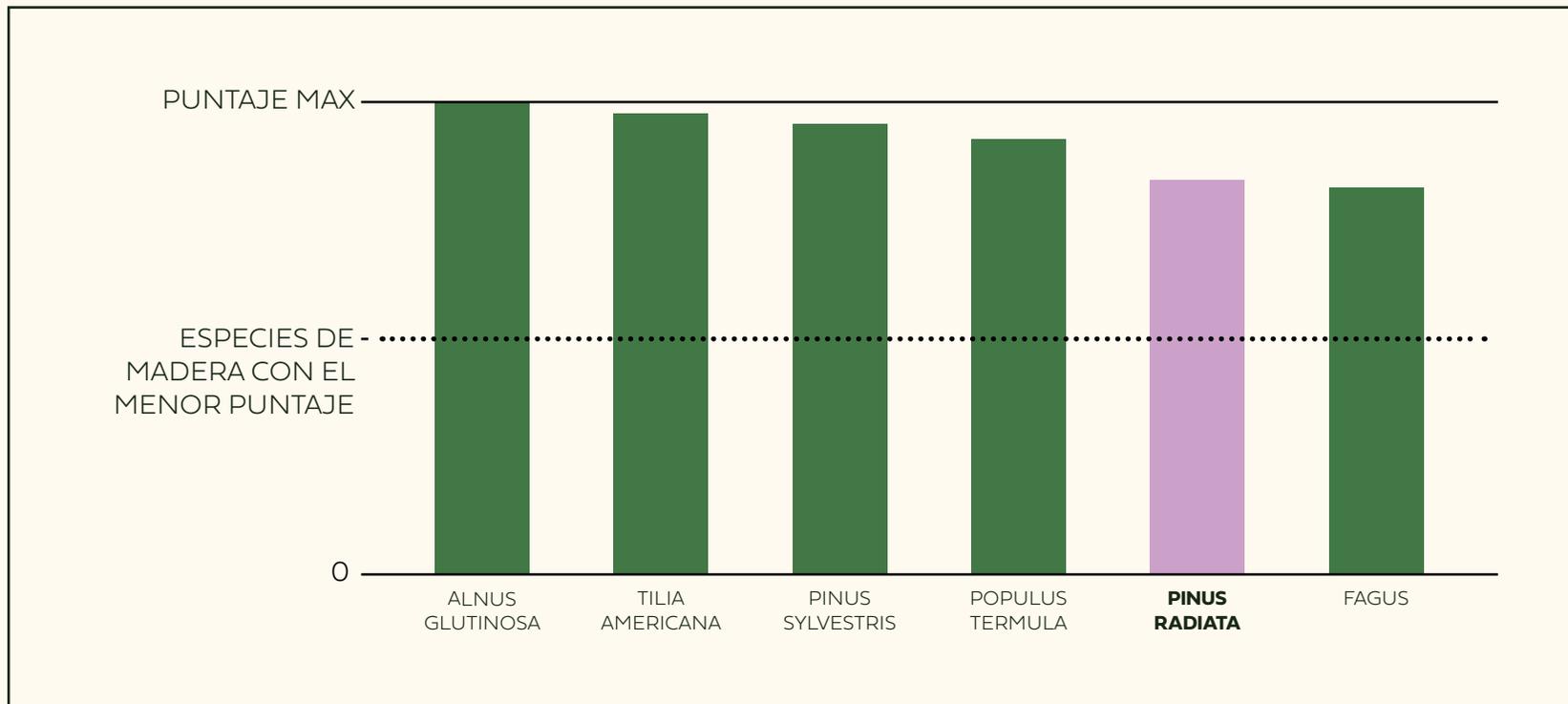
Relevancia Contemporánea

Producto de preocupaciones ambientales, hay un creciente interés en el uso de la madera. El desarrollo y caracterización de productos de ingeniería en madera (EWP's) provee nuevas posibilidades para el uso eficiente de la madera. Aun así se debe cuidar el impacto ambiental de los procesos involucrados en la producción de EWP's (Engineered Wood Products) y la densificación de madera, más allá de evitar el uso de agentes impregnantes sintéticos, se debe considerar el costo energético involucrado en la compresión y calentamiento de la madera, como también el posible impacto del tratamiento de la madera con químicos y soluciones delignificantes que pueden reducir la ventaja ambiental del uso de madera en primer lugar (Sotayo et al., 2019).

En el marco nacional, el pino radiata descrito anteriormente se acopla de forma armónica con las condiciones y ventajas de la densificación de madera, las maderas de baja densidad guardan un alto potencial de mejora ante el proceso de densificación y abre puertas para su implementación en modos y contextos de uso más avanzados (Sotayo et al., 2019). El pino radiata examinado ante la metodología propuesta por Neyses para la selección de especies de madera para densificación ocupa el quinto lugar, habiendo superado diversos criterios de tipo técnico, como alto potencial para densificación, alto potencial para incremento de dureza, alto potencial de deformación plástica. Además de criterios socioambientales como bajo impacto ambiental de uso y bajo costo de adquisición.

Potencial para Densificación

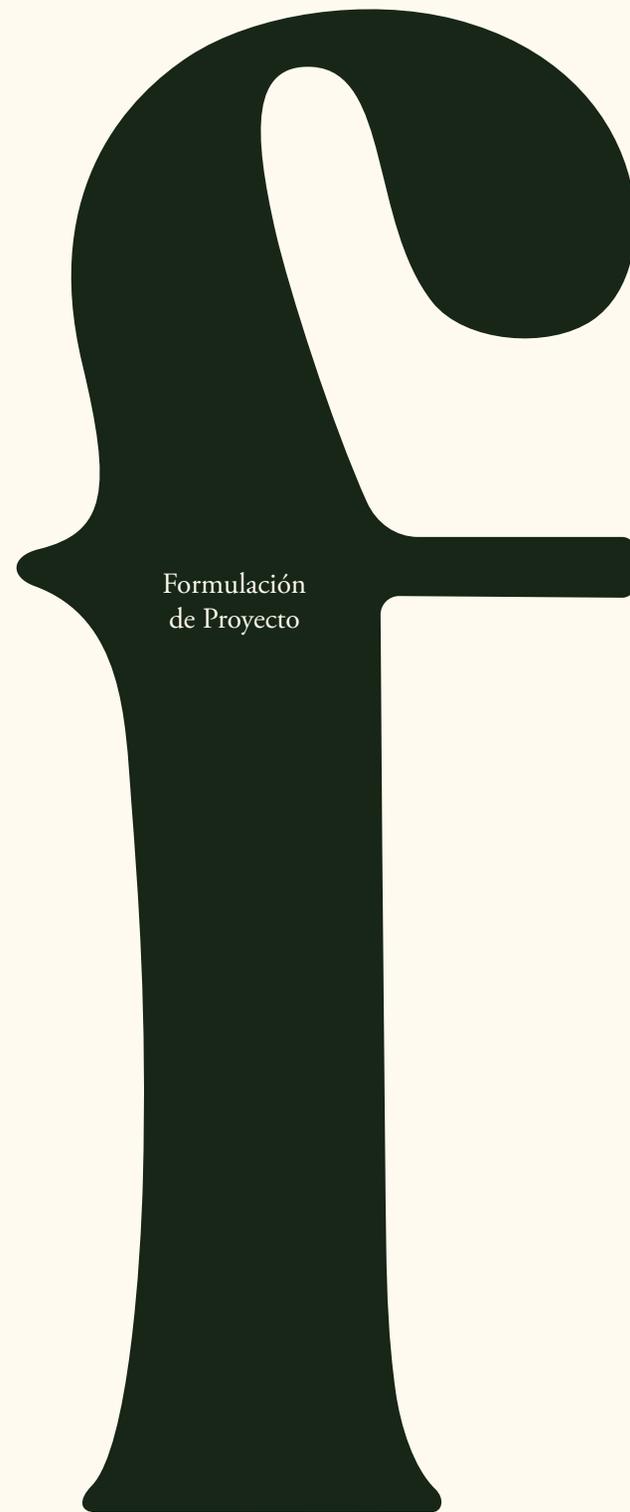
Oportunidad para el Pino Radiata



Ranking de distintas especies de madera según potencial para densificación. (Neyses, 2019).

Evidencia el potencial del pino radiata para ser densificado al tratarse de una especie asequible y poco densa se le puede aportar gran valor agregado a través de la densificación.

La densificación de pino radiata se perfila como una importante oportunidad en el escenario nacional, aportando valor a un material ampliamente disponible y renovable, que puede ser resignificado desde sus modos de uso e implementación. El pino densificado puede al mismo tiempo servir de reemplazo a especies nativas e importadas cuya producción es de mayor impacto ambiental y provienen de un contexto forestal crítico.



Formulación
de Proyecto

Oportunidad(es)

Mueble y Fijación

Ante la madera densificada que goza de un distintivo desempeño mecánico y considerando su repertorio de problemas asociados a la industrialización a escala y estabilidad dimensional, se distingue una oportunidad de diseño en torno a la mueblería de alta gama y productos de baja escala que no ameritan la disponibilidad industrial del material, sino que incluso su escaso y complejo tratamiento se torna en un valor agregado para el producto y una apertura al público para la madera densificada.

Sumado a esto, los problemas asociados a la estabilidad dimensional de la madera densificada frente a la humedad pueden resultar en una gran oportunidad como mecanismo de fijación mecánica y exploración formal. La tendencia a la hinchazón de la madera densificada puede ser utilizada a favor del diseño para generar fijaciones mecánicas permanentes entre múltiples piezas y por tanto reemplazar adhesivos y fijaciones de acero que traen consigo una mayor huella de carbono, simultáneamente aportando al valor constructivo y cosmético en torno a la manufactura monomaterial y el ensamble en el mundo de la mueblería.

Oportunidad(es)

Pertinencia Personal

Al aproximarme al concepto de densificación de madera durante la etapa de investigación del proyecto, rápidamente comencé a percibir un amplio vacío en torno a las aplicaciones de la madera densificada. Tan solo existe un proyecto debidamente documentado que pone este innovador material en manos de equipos de diseño.

Desde mi perspectiva personal y como diseñador me resultaban sumamente intrigantes todas las promesas del material y me dolía la escasez de aplicaciones de este en la esfera pública, con alguna consideración estética o funcional que fuera más allá de tan solo lo fuerte que pueda llegar a ser.

Al mismo tiempo mi pasión por el objeto diseñado y las bondades otorgadas por cada material resultaban en un acople armónico con la temática del proyecto y naturalmente orientaron las oportunidades de diseño que pude observar en el material.

¿Por qué no estamos
diseñando con esto?

¿Qué?

Mobiliario construido de pino radiata densificado a través de un proceso termo-hidro-mecánico que pone en evidencia la innovación material desde el valor formal y constructivo.

¿Por qué?

Porque la madera, y específicamente el pino radiata en el marco nacional, se perfila como un material necesario y protagonista para mantener el mundo construido de forma sostenible. Por tanto, amerita la búsqueda de avenidas de innovación que aporten valor a la madera. La densificación de madera es una forma de extraer un potencial mecánico elevado del pino radiata y de esta manera extender el horizonte de uso de una especie ampliamente disponible y sostenible en el tiempo. Además, una propuesta de producto de baja escala productiva como el mobiliario de autor permite aprovechar el desempeño mecánico del material sin verse obstaculizado por el tiempo y trabajo involucrado en densificar madera, es decir, tanto la escala productiva de la propuesta como su materia prima se acoplan en armonía.

¿Para qué?

Para poner en valor un material de ingeniería en madera que sirve para rescatar el material como uno propio del futuro y digno de innovación, respondiendo tanto a la evolución tecnológica del presente como a sus desafíos medioambientales. Además, aporta una perspectiva desde el diseño por sobre una materia prima cuyos contextos de uso e implementación actuales no responden con inteligencia al potencial de esta, ni sirven como una atractiva referencia pública del material. El proyecto sirve para plantear un objeto piloto que representa el potencial material de la madera densificada, y reintroduce la madera como una materia de diseño digna y contemporánea, desde la inteligencia formal y sofisticación propia de un proyecto de diseño.

Objetivo General

Comprender las propiedades físicas y oportunidades de tratamiento formal del pino radiata densificado, con el fin de diseñar piezas de mobiliario que ponen en valor el desempeño mecánico del material, su morfología y valor sostenible, de la mano con desafiar la estética habitual del mueble de madera.



1

Objetivo Específico

Identificar las propiedades físicas, desempeño mecánico y trabajabilidad de la madera densificada a través de diversas pruebas de laboratorio y metodologías de experimentación material.

2

Objetivo Específico

Investigar el potencial del springback y set-recovery propio de la madera densificada como método de fijación permanente entre dos o más piezas.

3

Objetivo Específico

Diseñar y construir un producto hecho a partir de pino radiata densificado que sirva como representación física de la tipología descrita. Además de constituirse como un objeto pionero en la implementación de madera densificada como innovación material, formal y constructiva en el marco del diseño de productos.

Semiótica de la Madera

Contexto y Relevancia para el Proyecto

La innovación material está al centro de este proyecto, por lo que además de tratar temas científicos y de mecanización, debe reconocer el valor sensorial del material trabajado. La madera nos antecede como especie, es parte de tanto el mundo natural como el que la humanidad ha creado y su historia impacta la forma en que nos relacionamos con ella. De esta forma, el producto de ingeniería en madera debe reconocer el contexto y valor social de la materia prima para aproximarse de forma consciente al manejo de esta.

La madera obtiene su sustancia de la tierra, vive, respira y trabaja. Tiene su calor latente, arde por dentro y guarda el tiempo en sus fibras (Bedolla, 2002). Es un material con un amplio abanico de aplicaciones e impacta lo visual, auditivo, táctil, olfativo e incluso gustativo. La madera en su calidad e historia guarda un especial lugar en lo ligado a la interacción, la vivienda y la composición del espacio habitable, lugar que ha conseguido en parte, gracias a la tendencia humana de, aún en un mundo artificial, rodearse de materiales y tonos propios de la naturaleza y su pasado primitivo. Ante esto, el trabajo con pino radiata densificado debe reconocer sus atributos de origen como una madera altamente asequible y de bajo valor social, siendo crítico analizar cómo estos atributos evolucionan y mutan al ser densificada.





Referentes
del Proyecto

Densificación

EPFL+ECAL Lab - Under Pressure

El proyecto Under Pressure fue una convocatoria de la EPFL+ECAL Lab, un centro de investigación e innovación ubicado en Lausanne, a cuatro agrupaciones de diseño en torno a extraer el potencial de la madera densificada en cuatro propuestas de producto. Este referente fue el punto de entrada al tema de investigación de seminario, se rescata por ser la única aproximación desde el diseño a la madera densificada que esté apropiadamente documentada.

Su relevancia como referente yace en las propuestas de producto resultantes de la convocatoria, que ponen en valor el tratamiento formal posible con madera densificada y la posicionan en un contexto radicalmente diferente a las aplicaciones actuales de manera densificada descritas en el marco teórico. La propuesta de Big Game Design demuestra la posibilidad de formar la madera con un molde como si se tratara de metal prensado, además la posibilidad de manipular no solo la densidad sino también la dirección y forma de la veta sin interrupciones, abriendo una dimensión cosmética muy relevante para el diseño de producto.



BIG GAME DESIGN, manilla de puerta de madera densificada desarrollada como parte de un proyecto de investigación con EPFL+ECAL Lab, 2011.





Normal Studio, audífonos de madera densificada desarrollados como parte de un proyecto de investigación con EPFL+ECAL Lab, 2012.



Paul Cocksedge Studio, tacones de madera densificada desarrollados como parte de un proyecto de investigación con EPFL+ECAL Lab, 2013.



Chris Kabel Studio, cascanueces de madera densificada desarrollado como parte de un proyecto de investigación con EPFL+ECAL Lab, 2014.



Densificación

EPFL+ECAL Lab - Under Pressure

Lamentablemente la totalidad de las propuestas de la convocatoria no evolucionaron más allá del espacio experimental y se mantienen en una escala dimensional reducida, lo cual sugiere que la técnica de densificación para productos de consumo es todavía inmadura, no tiene viabilidad comercial o el interés suficiente para que los estudios convocados continuaran su implementación.



Imagen promocional Sonowood.

Densificación Sonowood

Sonowood es un producto de Swiss Wood Solutions que ofrece maderas con distintos perfiles de densificación para la manufactura de instrumentos musicales, otorgando una avenida distinta a utilizar maderas exóticas sobreexplotadas. Se rescata por la oportunidad encontrada para la implementación de madera densificada de manera inteligente, entendiendo esta más allá de su desempeño mecánico, considerando el perfil acústico y como distintos grados de densificación pueden servir distintas necesidades.



Es interesante notar como la empresa apunta a la fabricación con madera densificada de piezas específicas de alto rendimiento que deben soportar un alto nivel de estrés y contacto. Además, la empresa asegura una materia prima inteligente que abraza el desempeño acústico esperado. El argumento de la customización, más allá de la mejora bruta de la madera, a través del densificado es una interesante profundización en el espectro de posibilidades del material.

Cola de violín en maple densificado Sonowood.



Diapasón de violín en maple densificado Sonowood.

Técnica, Historia y Forma

Christian Borger - Ultralight

La colección Ultralight son objetos de mobiliario experimental realizados por el arquitecto Christian Borger en Boston desde el año 2020. Se rescata por como la propuesta logra aunar una calidad estética y tratamiento formal íntegro y pulido con un valor estructural y técnica constructiva que se aproxima desde la ingeniería y uso eficiente del material, de la mano con el protagonismo de la madera como elemento no solamente cosmético sino también estructural y necesario para los objetivos de un proyecto de mueble contemporáneo.

Representa un referente formal cercano al proyecto, compartiendo la ambición por la eficiencia material de la mano con el valor plástico y constructivo.





Silla CH-03-HB.



Mesa CT-02-C.

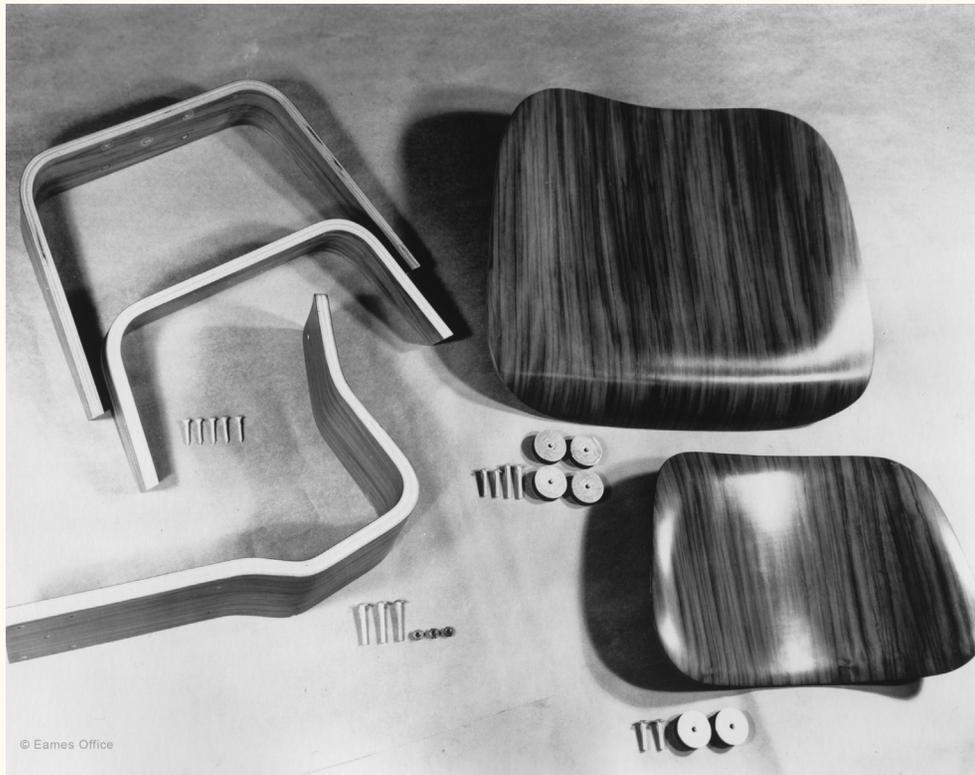
Técnica, Historia y Forma

Eames Plywood LCW Lounge Chair

Conocida como la “Eames Chair”, es una silla icónica del siglo XX, diseñada por Charles y Ray Eames. Fue de los primeros ejemplares de silla hecha a partir de madera laminada con doble curvatura, producto de su investigación material para la armada de los Estados Unidos. Se observa este referente histórico por la innovación tecnológica de trabajo en madera que evidencia, marcando un antes y después en las técnicas disponibles para la producción de mobiliario y el potencial de la madera. Además, se hace cargo de la innovación con oficio formal, ergonomía e interés visual suficiente para convertirse en un clásico del diseño y ser producida hasta el día de hoy.

Representa un punto de inspiración metodológica e histórica en torno a la innovación material y su concepción desde la óptica del diseño.

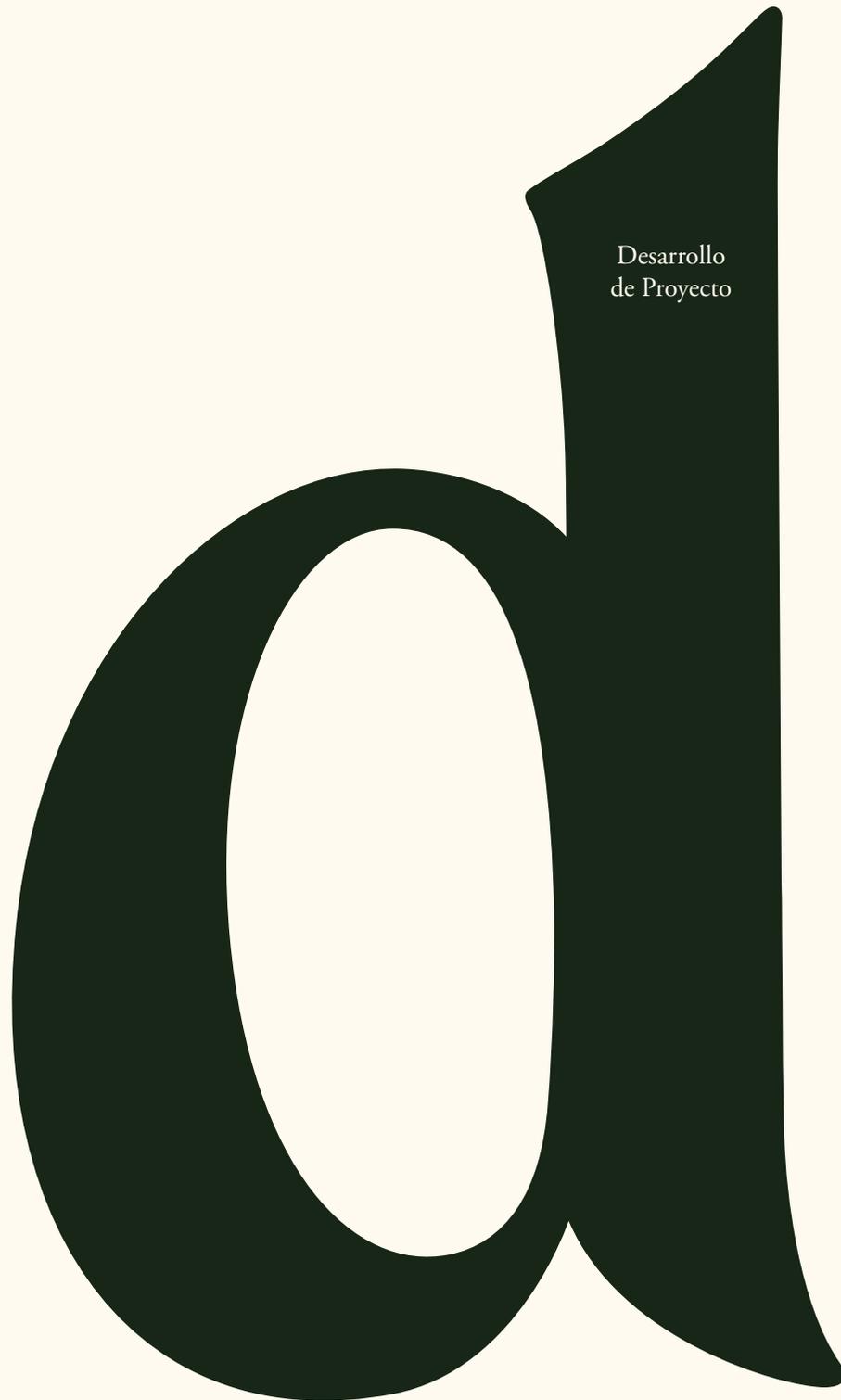




Silla LCW, en ocasiones denominada la *silla del siglo*, es una rara ocasión en que se logró un acierto tanto técnico como formal simultáneamente.

Se puede observar un despiece que evidencia el sistema constructivo y el cilindro clave para el funcionamiento de la silla denominado *shock-mount*.





Desarrollo
de Proyecto



Primera Aproximación

Densificación Inicial

Durante el proceso de seminario de título la principal actividad de investigación fue una aproximación inicial a la densificación de madera, para esto, se llevó a cabo un proceso de densificación de pino radiata según el método detallado por Song et al., en la publicación Processing bulk natural wood, into a high-performance structural material (2018). El método consta de una etapa inicial de remoción parcial de lignina de la madera mediante una solución hirviendo de hidróxido de sodio y sulfito de sodio. A esto le sigue la limpieza de la madera mediante baños en agua desionizada hirviendo. Una vez plastificada (ablandada) la madera a través de las etapas iniciales, se debe prensar en una prensa caliente y comprimir hasta su espesor deseado, la fijación mecánica debe permanecer hasta que la humedad de la madera disminuya y la pieza se haya secado.







Se densificaron cuatro probetas de pino radiata utilizando simples implementos de cocina y luego prensas tipo C para reducir el volumen e ingresar las muestras prensadas a un horno. Fue importante aproximarse al trabajo práctico de densificación de forma temprana, ya que no solo permitió entrar en contacto físico con el material, sino que también enfrentar el desafío que significa densificar, en función de los instrumentos necesarios para hacerlo.



Esta primera aproximación a la densificación lograda con herramientas y técnicas rudimentarias no fue ideal, y dejó en evidencia que el primer gran desafío del desarrollo del proyecto no sería —que hacer con el material— sino que como producirlo de forma estable y sistemática.





Resultó evidente que la técnica con que se produjeron las primeras probetas no se puede escalar a formatos más grandes de madera ni a un mayor volumen de muestras. Se requiere mayor fuerza de compresión que la que se puede lograr con prensas manuales o de banco, además esta compresión debe estar distribuida equitativamente para obtener un perfil de densificación estable e idealmente las mandíbulas que comprimen la madera, o el medio de densificación, debe ser capaz de calentarse.

Paralelamente la etapa previa de preparación de la madera no se puede escalar a dimensiones mayores de madera por los límites espaciales de una cocina y contenedores para la muestra.





Intrumentos para Densificar

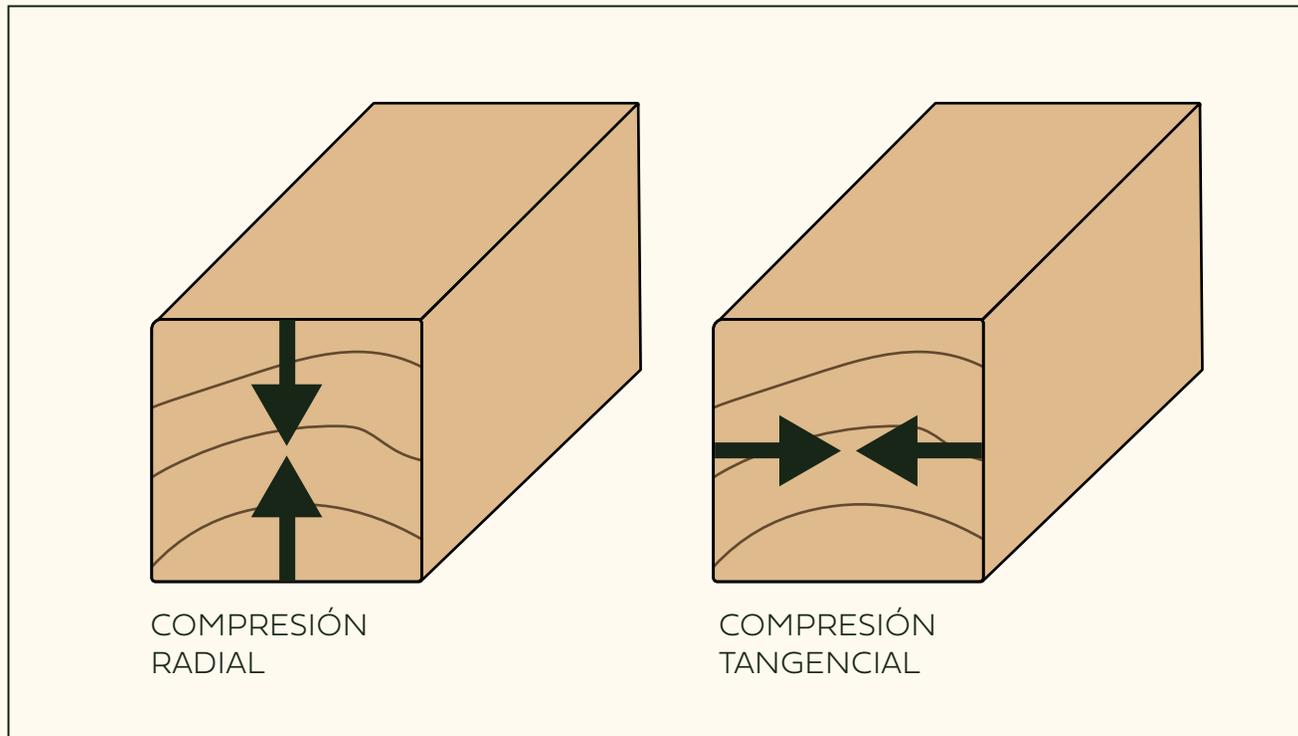
Abordando el Desafío

Fue prontamente aparente que el equipamiento necesario para densificar no se encuentra en el mercado, y por la frecuencia de uso que debería darle al instrumental, tampoco resultaba viable encontrar un laboratorio que me pudiera abrir las puertas. El primer esfuerzo de diseño del proyecto sería diseñar y construir los instrumentos necesarios para densificar madera. Estos son dos, un equipo que se encargue de la etapa de plastificación, es decir, saturar de agua y ablandar la madera, y el segundo, que debe prensar y secar la madera. Para estos se planteó un requerimiento principal para dar partida al proceso de diseño.

El sistema tendría la capacidad máxima de procesar un listón de madera de 50x50x600mm.

Esta decisión fue tomada en función de dos parámetros principales, en primer lugar, el largo de 600mm ya que es suficiente para variedad de aplicaciones dentro de la mueblería, especialmente respecto a sillas cuya altura de sentado promedio, y por ende las patas, son habitualmente de 450mm de largo.

Por el otro lado, la sección de 50x50mm responde al formato de venta del pino radiata, el listón de 2x2 pulgadas, es un formato masivo y asequible de pino que responde tanto al planteamiento de valor agregado detallado anteriormente, como al manejo práctico de la materia prima.



Gráfica explicativa de la dirección de compresión de la madera.

Todos los especímenes de madera a lo largo del proyecto fueron densificados a través de compresión radial en función de una mayor estabilidad dimensional y eficiencia del esfuerzo.

Intrumentos para Densificar

Conceptualización - Plataforma de Densificación

La conceptualización inicial fue dirigida a la prensa caliente, que a continuación será referida como la plataforma de densificación (PD). La bibliografía indica la necesidad de tanto prensar como calentar la madera de forma simultánea para poder deshumidificar el material y conseguir que se mantenga estable dimensionalmente una vez fuera de la prensa.

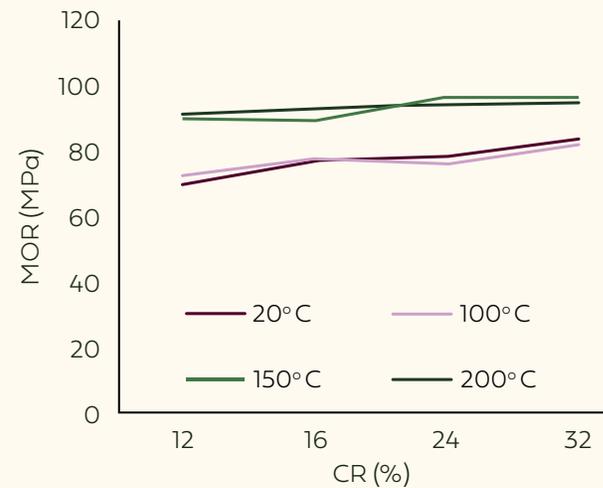
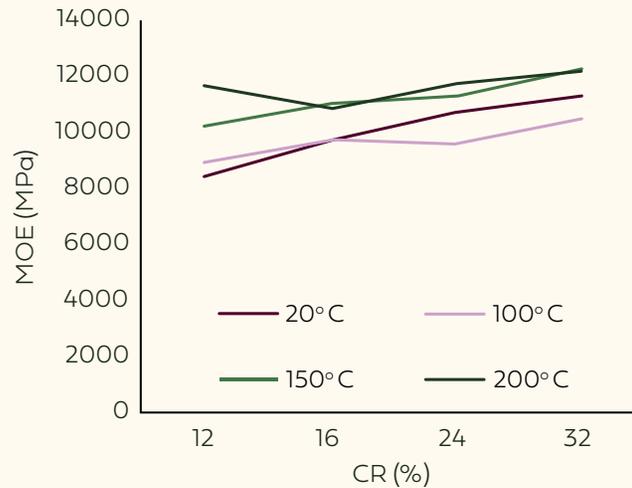
La forma más eficiente de generar la presión necesaria para la prensa sin involucrar manufactura especializada sería a través de un sistema hidráulico al cual se puede acceder fácilmente a través de gatas hidráulicas para autos, estas pueden ser adaptadas dentro de un marco rígido para servir como fuente de presión en la plataforma de densificación.

El mayor desafío en el diseño de la PD fue incorporar el calor al sistema, intuitivamente generar calor a través de una resistencia eléctrica sería lo más apropiado, pero era un tipo de trabajo al que nunca me había enfrentado e ignoraba completamente. Busqué ayuda y contacté a un ingeniero mecánico, quien me ayudo a resolver dudas y aprensiones respecto los componentes eléctricos necesarios para calentar las mandíbulas de la prensa en el ambiente húmedo que generaría la madera.



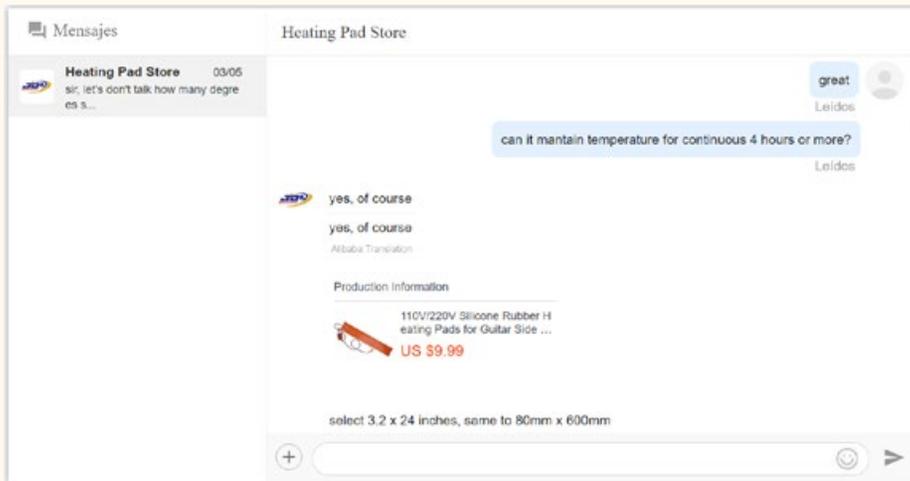
Como indica la bibliografía, el sistema idealmente debe alcanzar entre 150 y 200 °C para producir madera densificada con el mejor perfil mecánico posible. La investigación de mercado de posibles fuentes de calor concluyó en mantas de silicona calefaccionadas, estas contienen una resistencia y se les puede añadir un controlador de temperatura, se ocupan para un rango de aplicaciones desde calentar tanques de agua en un contexto industrial, hasta proporcionar el calor para camas de impresión 3D.

Su aplicación en la PD sería al interior de perfiles de acero que sirven como mandíbulas de la prensa, de esta forma se puede calentar el espécimen a través de la cara de contacto del perfil mientras el manto se resguarda al interior de este y no es sujeto a presión, para esto los mantos deben estar hechos a medida. Se compraron cuatro resistencias hechas a medida a través de un proveedor de la plataforma Ali Express, para así tener redundancia en caso de fallo o defecto.



Curvas de MOE/MOR-ratio de compresión en función de la temperatura de prensado de las muestras. (Cabral, 2022).

Evidencian que el mejor desempeño mecánico se obtiene con temperaturas de prensado entre 150 y 200 °C.



Manta de silicona con resistencia eléctrica interna y controlador de temperatura.

Fueron el medio a través del cual se calientan las mandíbulas de la plataforma de densificación y se hierve el agua en la plataforma de plastificación.



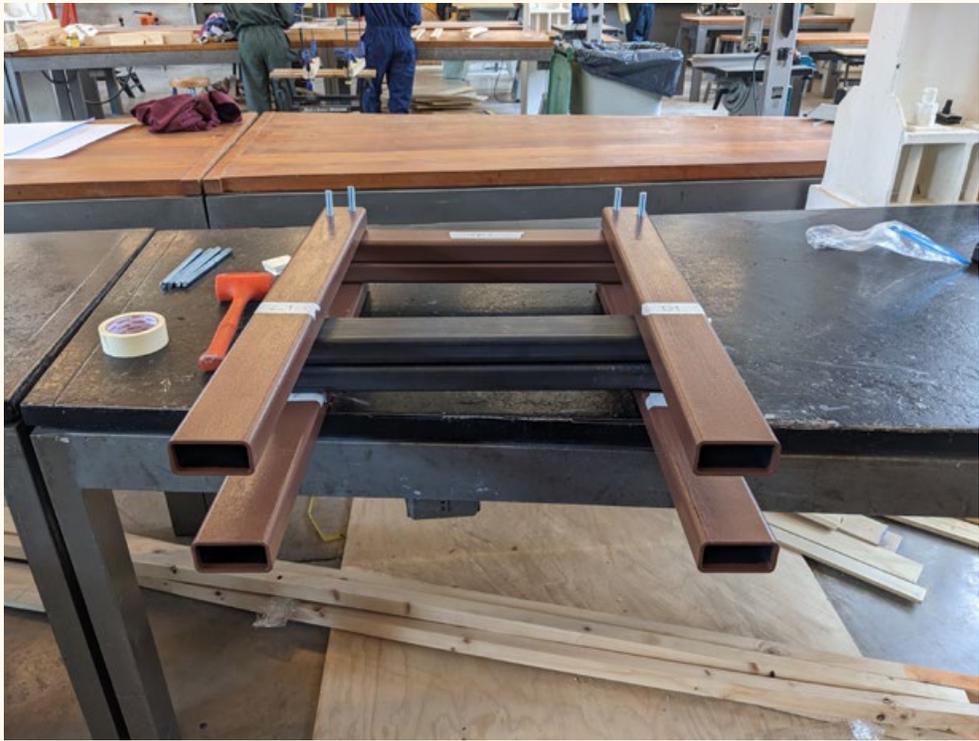
Intrumentos para Densificar

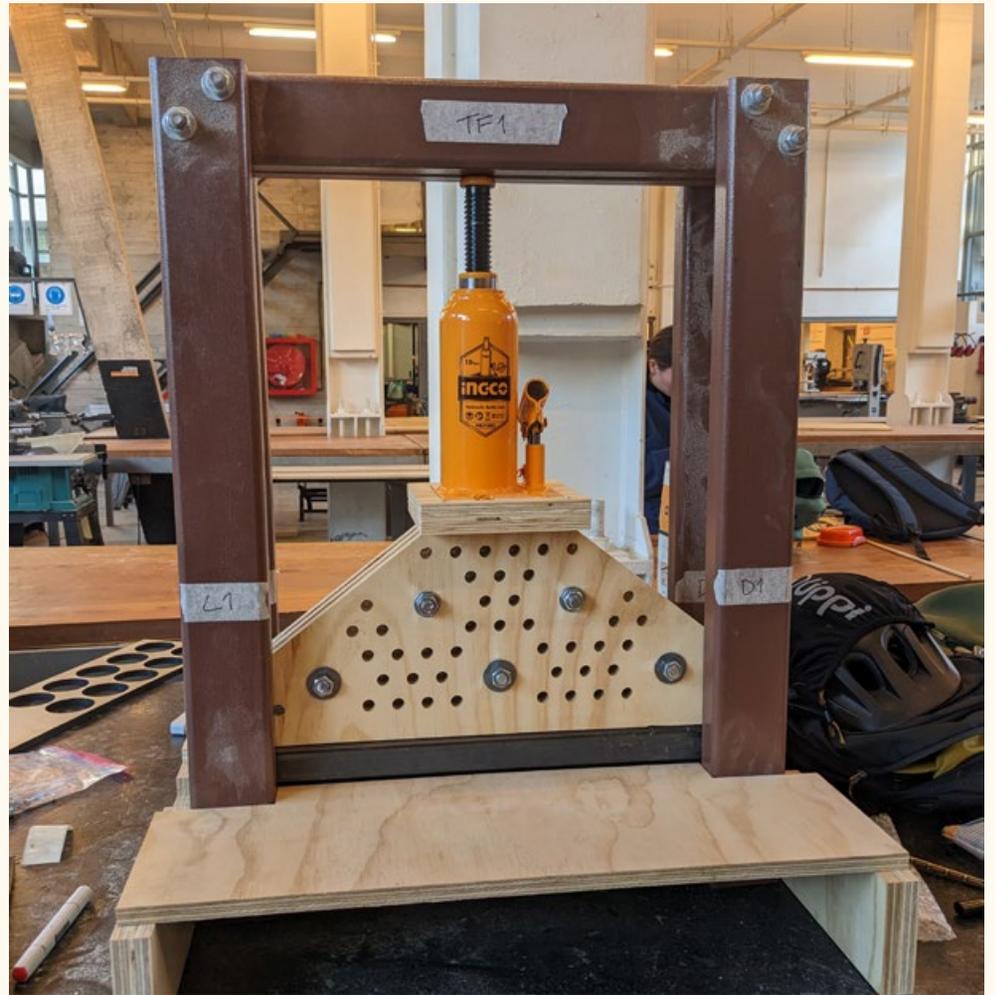
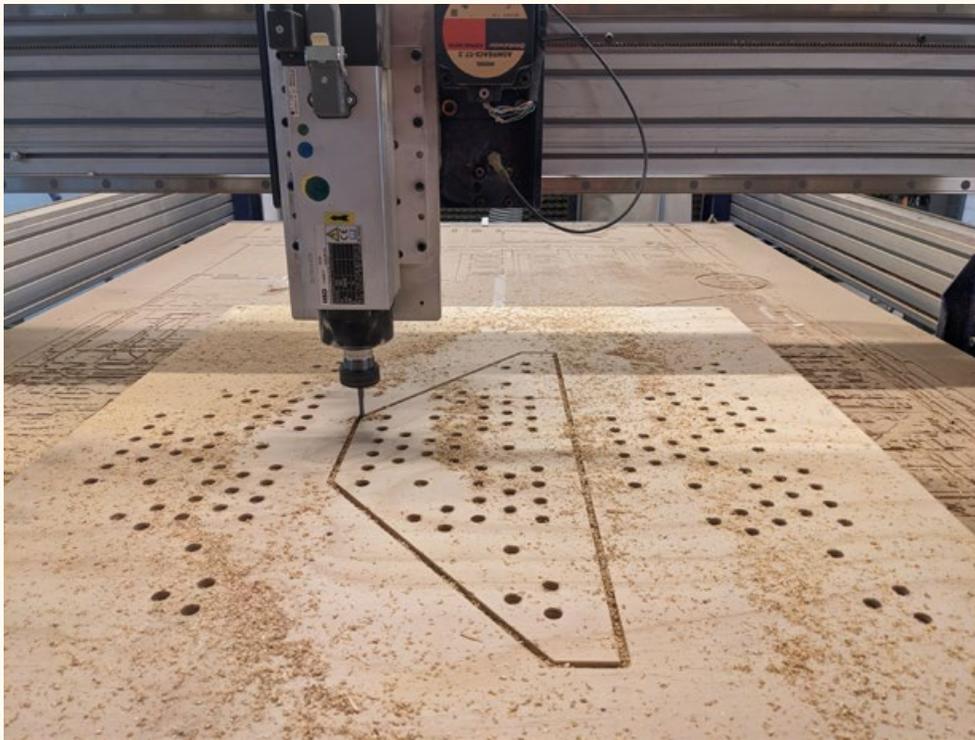
Decisiones de Diseño - Plataforma de Densificación

La plataforma de densificación fue concebida en torno a un mismo perfil de acero para construir el marco y mandíbulas de la prensa, además incorpora una pirámide de terciado para distribuir la presión de la gata que se anida en una base del mismo terciado y presiona contra el travesaño del marco.

La totalidad de la PD está diseñada para requerir de tan solo un perfil de acero de 80x40x6000 y 4mm de espesor para su construcción y maximizar la dimensión disponible para acoger un listón de 600mm y un aire generoso por si se requiere robustecer la base de contacto, densificar un espécimen de mayor altura o utilizar una gata de mayor envergadura en caso de que se requiera mayor fuerza.

Se tomó la decisión de ensamblar el marco con pernos cruzados para ofrecer la posibilidad de arme y desarme y al mismo tiempo evitar el soldado ya que es una técnica con la que no tengo experiencia y esto podía ralentizar la fabricación de los instrumentos.







Se ideó una sistema con resortes para mantener la manta de silicona en contacto con la cara interior del perfil de acero, permite que sea removible facilmente y el terciado aísla el calor así se puede transmitir de forma eficiente a través de la cara deseada del acero.

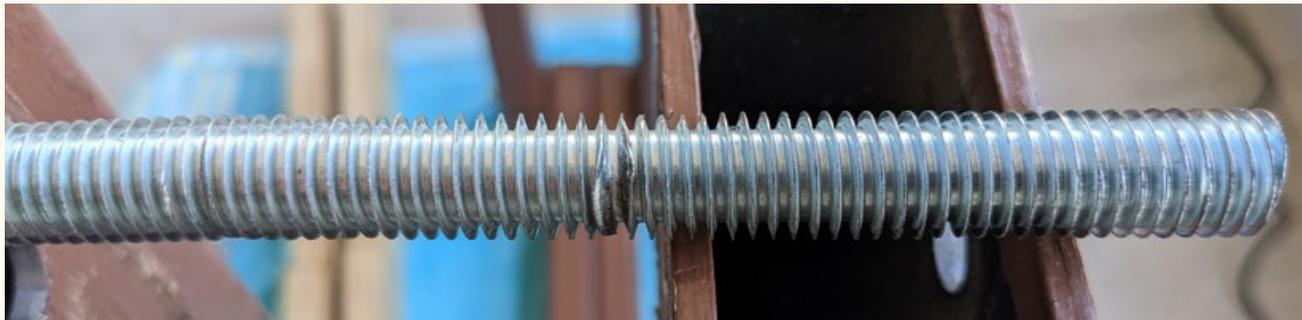
Instrumentos para Densificar

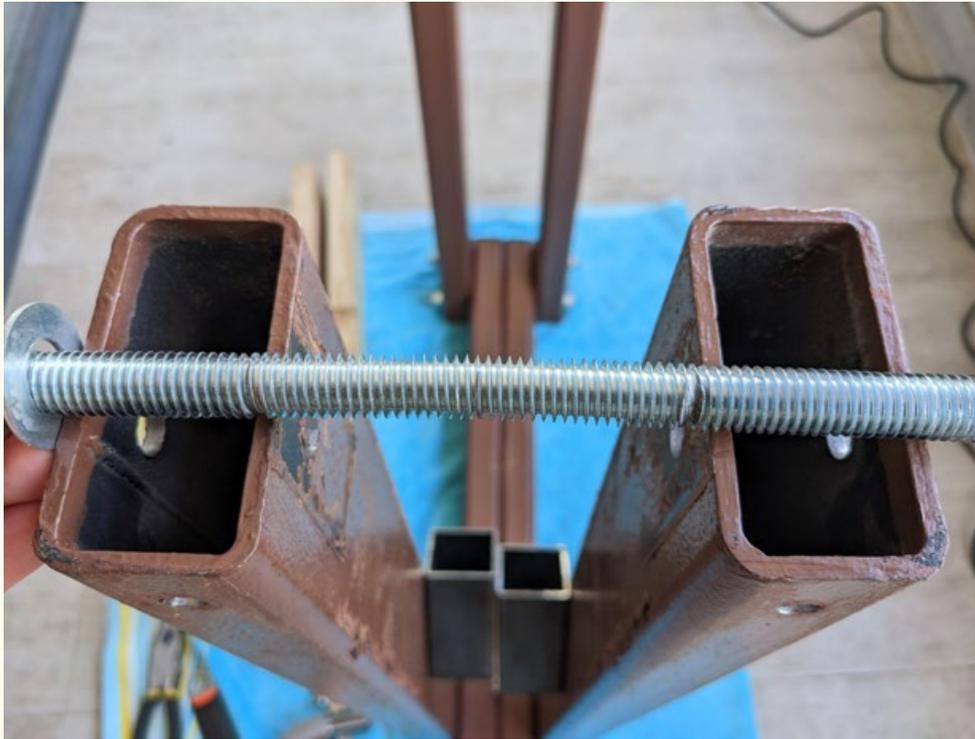
Problemas - Plataforma de Densificación

El proceso de manufactura de la plataforma de densificación avanzó sin mayores dificultades, una vez construido el marco se debieron incorporar soportes laterales de madera para estabilizarlo y luego de las primeras densificaciones se debió reforzar el apoyo de la mandíbula inferior la cual corría riesgo de doblarse irreparablemente ante el esfuerzo que debía soportar.

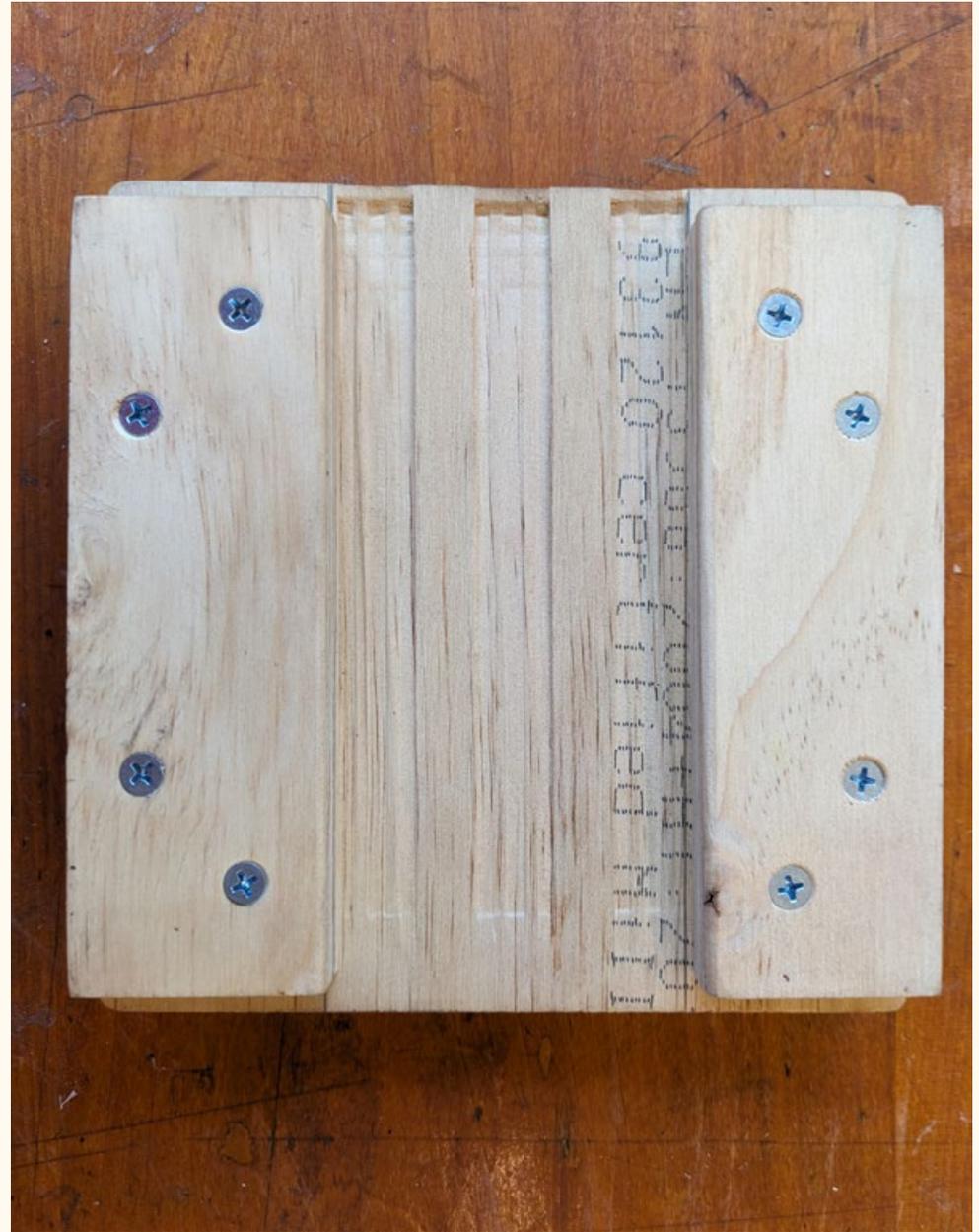
Al sumar varios ciclos de densificación las fijaciones que sostienen la base comenzaron a ceder y la totalidad de la prensa se comenzó a levantar del piso, para esto se reemplazó el perfil que conecta ambos lados de la base y se reemplazó el hilo de ½ pulgada por un perno de mayor durabilidad. Sumado a esto la base de terciado que anida la gata comenzó a ceder a la presión y se generó un bajo relieve irregular, la placa de terciado deformada fue reemplazada por terciado de abedul de mayor densidad que es más estable ante la presión.

El funcionamiento general de la plataforma de densificación no se vió impedido por estos problemas y suma treinta ciclos de densificación. La gata en ocasiones pierde presión y cede parte de su recorrido a la hinchazón de la madera por lo que iteraciones inmediatas de la PD deben incorporar un sistema para bloquear las mandíbulas en su lugar una vez se obtiene la compresión deseada, lo que permitirá quitar el estrés de la gata y solo ocuparla para la compresión inicial. Actualmente este problema se resuelve con dos tacos de madera que se encajan entre el travesaño de la plataforma y base de la gata.





Hilo colapsado ante la presión del la gata.



Deformación en bajorelieve en la superficie de contacto inferior de la base de la gata, su irregularidad producía una leve pendiente y por eso debió ser reemplazada.



Intrumentos para Densificar

Conceptualización - Plataforma de Plastificación

La plataforma de plastificación (PP) es la encargada de someter la madera a humedad y ablandar la fibra para que, al momento de presar, se reduzca el vacío celular o lumen de la madera sin ocasionar fractura material. El proceso de plastificación detallado en la aproximación inicial incluía una solución de hidróxido de sodio y sulfito de sodio encargada de remover lignina de la madera, si bien esto se siguió acorde al ensayo de la bibliografía no es indispensable para el proceso, además trae consigo mayores costos, limitantes materiales por el carácter corrosivo de la solución y opaca el espíritu sostenible del proyecto. Ante esto el proceso de plastificación conceptualizado para la plataforma ocupa solamente agua y temperatura.

Inicialmente, siguiendo lo que parte de la bibliografía expresaba, se diseñó y construyó una cámara de vapor para humedecer la madera. Inspirada en las cámaras de vapor utilizadas para la manufactura de piezas curvas y reducida a su mínima expresión para albergar un listón de 2x2 pulgadas, se adaptó un tubo de PVC sanitario de 110mm de diámetro para servir como cámara con entrada para la madera y una manguera de freno conectada a una tetera intervenida para producir vapor.



Era un sistema relativamente simple que funcionaba como cámara de vapor, pero al hacer la primera prueba del sistema en conjunto con la plataforma de densificación resultaba sumamente lenta en saturar la madera y en habilitarla para ser densificada. Para la primera prueba se mantuvo tres horas la madera al interior de la cámara y no fue suficiente para densificar de forma apropiada. Además de esto la compuerta para extraer la madera era difícil y lenta de operar, sumado que se debía prestar atención a la tetera para mantener un volumen de agua constante.



Work Camera / NO INTERVENIR

Intrumentos para Densificar

Pivoteo - Plataforma de Plastificación

El mal desempeño de la cámara de vapor impulsó la conceptualización de la plataforma de densificación por inmersión, a diferencia del vapor cuyo manejo era más engorroso, la posibilidad de sumergir el listón de madera en agua hirviendo es más simple, aunque se requiere de un receptáculo susceptible a ser calentado para mantener la temperatura del agua.

Es así como se ocuparon las mangas de silicona sobrantes de la plataforma de densificación para calentar un tubo de acero inoxidable de 3 pulgadas de diámetro, el cual permite albergar el listón de madera con agua hirviendo en su interior mientras las resistencias eléctricas abrazan el tubo por fuera y el tamaño de este es óptimo para la eficiencia energética del sistema.



Se adquirió el tubo de acero inoxidable de un distribuidor de partes para autos, se tapó un extremo con terciado de abedul a presión asistido por una abrazadera y se sostuvieron las resistencias al exterior con amarras plásticas. El pivoteo de la PP se logró de forma expedita y con buenos resultados, no hubo problemas de fugas y tan solo se debió incorporar un contrapeso en la apertura superior para mantener el listón sumergido durante las dos horas de plastificación.

Posteriormente se fabricó un soporte para sostener el tubo y se diseñó otro soporte impreso en 3D para el controlador de temperatura de las resistencias, para así pulir la interacción con la plataforma y evitar el contacto de estas piezas con el suelo que se puede mojar debido a salpicaduras del agua hirviendo.



Instrumentos para Densificar

Interacción y Flujo entre Plataformas

Finalizada la fabricación de ambas plataformas necesarias para densificar madera se abrió paso a la sistematización de este proceso y familiarización con los instrumentos.

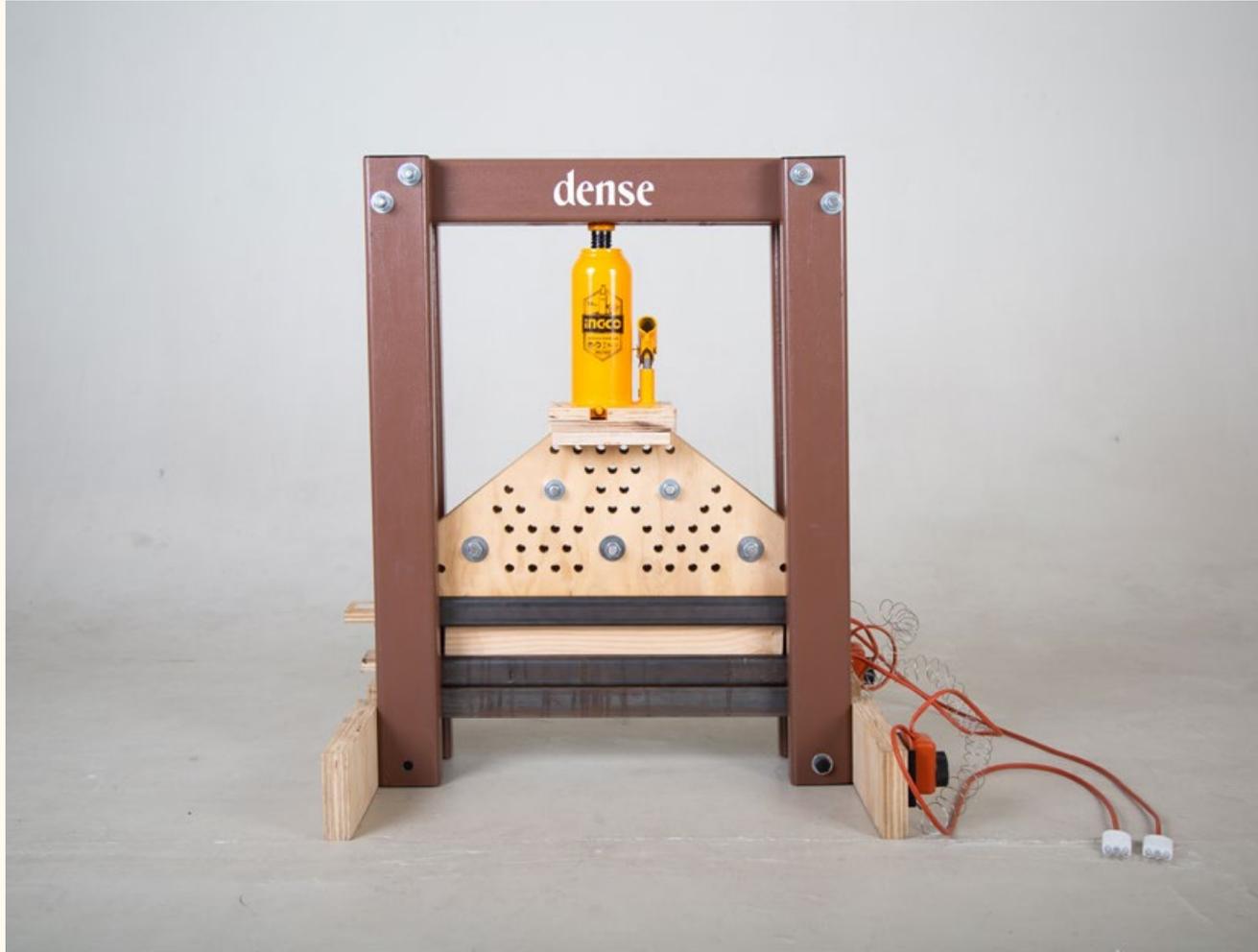
En primer lugar, el equipamiento, que fue en su mayoría fabricado en el taller de herramientas de la FADEU, se trasladó a mi vivienda donde la terraza se convertiría en el centro de operaciones para facilitar la densificación constante de madera y resguardo apropiado del equipamiento.

El flujo de trabajo de la densificación comienza en el stock de listones de pino cepillado de 2x2 pulgadas y 550mm de largo. Estos listones deben ser seleccionados cuidadosamente para evitar fracturas y nudos en la madera que comprometen el proceso de densificación. Una vez con la materia prima lista se debe calentar agua en la plataforma de plastificación y una vez hirviendo se ingresa el listón y se tapa. Allí permanece dos horas sin intervención, minutos antes de cumplidas se organizan los elementos de la plataforma de densificación y se precalientan las mandíbulas a 200 °C, alcanzada esta temperatura se da paso a una maniobra que se debe hacer con rapidez.





Plataforma de plastificación (PP)
Diseño y fabricación propia.



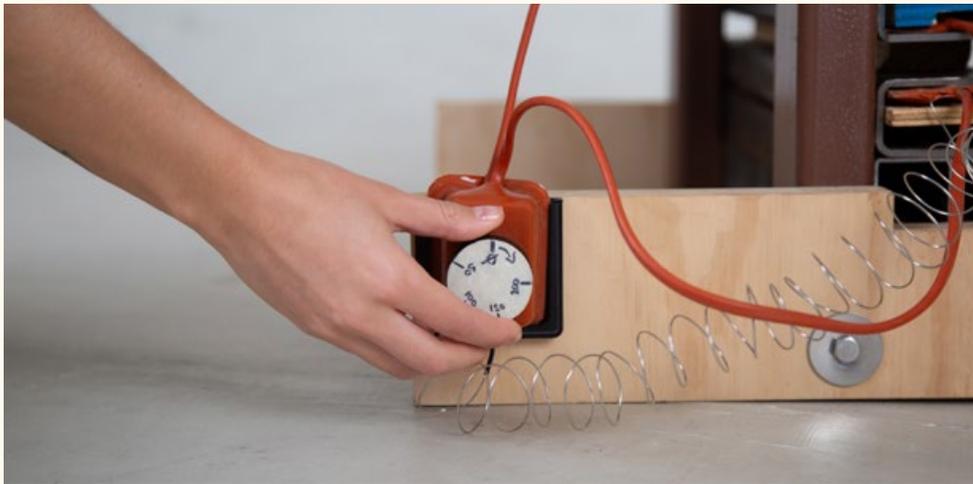
Plataforma de densificación (PD)
Diseño y fabricación propia.

Con guantes se debe tomar el tubo de la PP y verter el agua hirviendo en un contenedor, se extrae el listón, este es posicionado cuidadosamente en el centro de la mandíbula inferior de la PD, una vez cazado el material en la prensa se regula la altura del pistón de la gata y se procede a accionar la gata y comprimir el listón de pino al espesor deseado, inmediatamente después se encajan dos listones de pino entre el travesaño y la base de la gata para mantener la compresión y evitar la regresión del pistón detallada anteriormente.

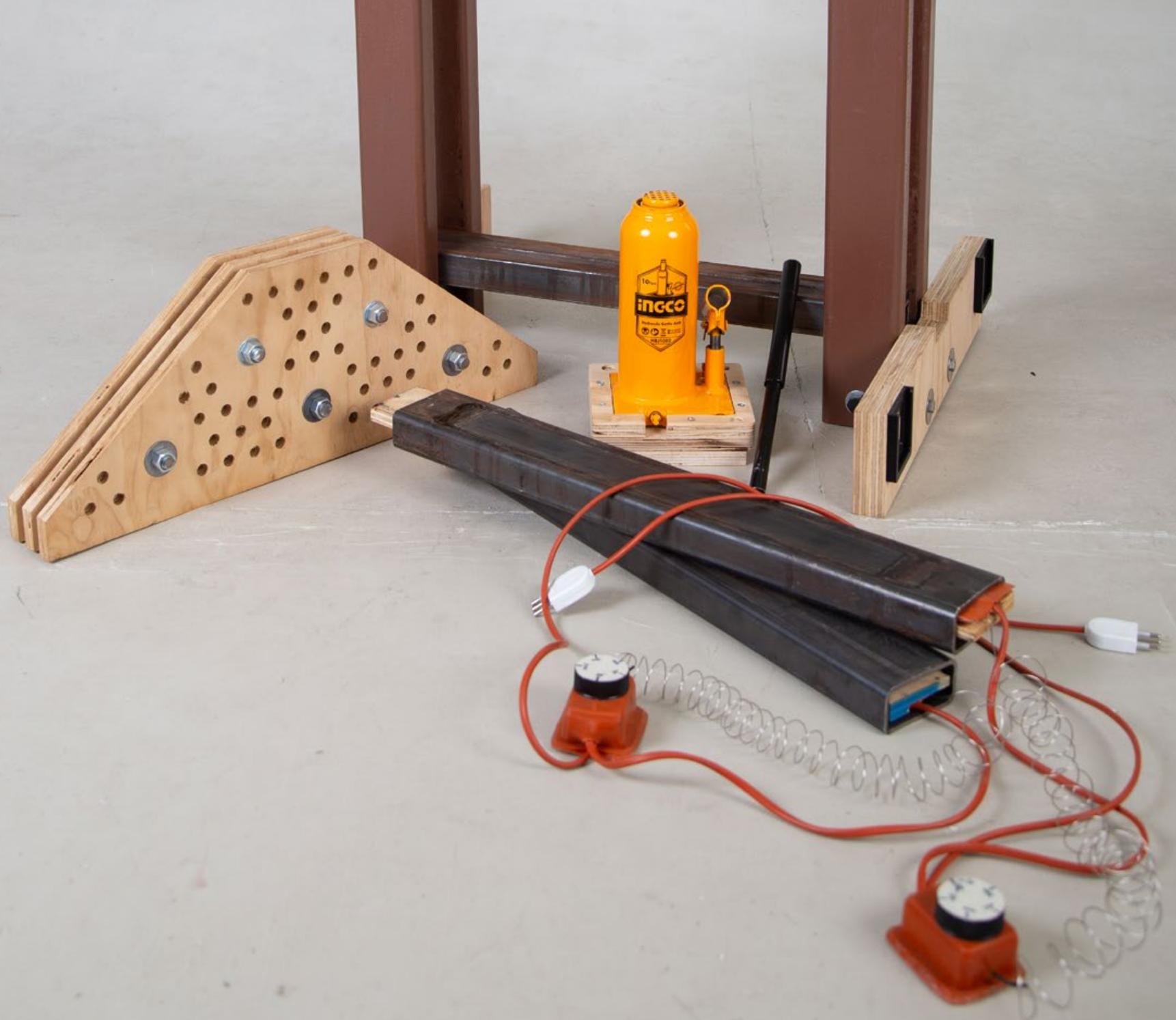
Fijado el material se reduce la temperatura en 50 °C cada hora, pasadas cuatro horas el material alcanza temperatura ambiente y puede ser retirado de la prensa para comenzar otro ciclo de densificación.

Es importante mantener alta temperatura por al menos dos horas y regresar progresivamente a temperatura ambiente, ya que, de acuerdo a la bibliografía, esto favorece la estabilidad dimensional de la madera resultante, es decir que el fenómeno del spring-back se reduce casi por completo, por lo que la madera no responderá de forma inmediata a la liberación de la prensa y mantendrá el espesor esperado. También reduce el impacto del set-recovery, que describe la hinchazón paulatina de la madera en un tiempo prolongado por la exposición a humedad ambiental, no obstante, ante el contacto directo con agua la madera si se deformará acorde a la absorción de esta.





Flujo de uso de la plataforma de densificación: prender resistencias, ajustar gata, ingresar espécimen y comprimir hasta reducción de altura deseada.





Primeros Resultados

Experiencia Práctica

Con las primeras muestras de pino densificado en mano ya era muy interesante tan solo notar como la percepción de peso era mucho mayor que comparado con la dimensión original, también era evidente como la dureza del material había evolucionado de la mano con varios factores sensoriales que se discutirán más adelante.

La primera densificación se llevó al fallo, es decir que la gata fue accionada hasta el límite prudente de fuerza que se podía ejercer sobre la palanca, resultando en una reducción de volumen de aproximadamente 50%, los ciclos que siguieron fueron orientados a obtener distintos grados de reducción de volumen y comprender los factores que afectan esto.

Al superar largos de compresión aproximadamente mayores a 24mm, es decir, compresiones de más del 60% de la altura del espécimen se acusan problemas en el material, con suficiente constancia, cada vez que se supera este límite el listón sufre deformaciones extremas y la fibra se agrieta, estos fenómenos se manifiestan desde el centro de la muestra hacia afuera y el listón adopta una forma aplastada mediante las paredes laterales que no están en contacto con la prensa se alejan de sí buscando espacio para contener el material que está siendo comprimido, mientras al centro de la muestra se generan desgarros de la fibra.

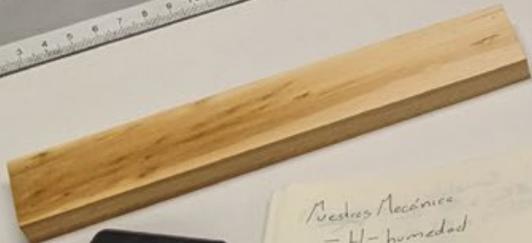


El área de compresión tiene el mayor impacto sobre la fuerza necesaria para comprimir el material, es decir, que especímenes mas largos requieren de mayor fuerza debido a la cantidad de material que se debe reducir. Muestras de 600mm generan un alto grado de resistencia y resulta difícil comprimir más allá de un 40% de su altura, mientras que muestras de 550mm alcanzan el 50% y especímenes con un largo menor a 400mm pueden ser cómodamente comprimidos hasta un 60%, más allá de esto siendo innecesario por la deformación descrita previamente.

Para muestras más largas alcanzar mayor compresión parece ser cuestión de fuerza, por lo que una gata hidráulica de mayor tonelaje puede servir, pero lo que es evidente es que con los procesos actuales un 60% de reducción de altura del material es el límite previo a la aparición de deformaciones y fracturas.

Los ciclos de densificación continuaron con el objetivo de obtener un stock de listones densificados al 50% para hacer pruebas prácticas con el material, mientras al mismo tiempo se preparaban muestras en distintos grados de densificación para la realización de ensayos mecánicos.

Muestras de madera densificada en distintos grados de compresión, especímenes de la derecha demuestran deformación y fractura debido a compresión extrema.



Medidas Necesarias
- H - humedad

Dimensiones y V
Dense:
~~20: h:27 A:33,1 L:510 V: 362,3cm³~~
40: h:18,6 A:34,4 L:285 V: 182,3cm³
50: h:12,5 A:34,4 L:195 V: 83,8cm³
60: h:8,8 A:33,2 L:300 V: 79,68cm³
20: h:27 A:34,4 L:510 V: 473,6cm³

Control:
C : h:40,5 A:40,2 L:600 V: 976,8cm³
C50: h:12 A:33,4 L:195 V: 78,1cm³

Control
- Re: homo

C: H: A: 11,6% B: 10,4% g: 529g^s
C50: H: A: 11,1% B: 11,7% g: 42g^s



Ensayos Prácticos

Densificación Laminar

Durante el desarrollo del proyecto se llevaron a cabo distintas pruebas prácticas con el material para mejor comprender su comportamiento frente a la humedad, terminaciones y formatos de densificación.

Se propuso densificar una delgada lámina de pino en dirección tangencial para explorar la evolución de esta y posibles oportunidades asociadas al material en mínimo espesor. Se redujo una lámina de 4.5mm de espesor a 2.3mm de espesor con un incremento en densidad de 81% y se sometió la lámina resultante a una serie de pruebas para mejor comprender su comportamiento mecánico. El principal hallazgo fue el nivel de ductilidad alcanzado por la pieza, muy superior al estado original de esta, sumado a una terminación superficial sumamente lisa y estable, es una avenida digna de mayor exploración en torno a los formatos de densificación y las oportunidades que ofrecen.

Densificación chapa

p1: espesor: 4.5 mm
ancho: 405 mm
largo: 450 mm
peso: 42 g

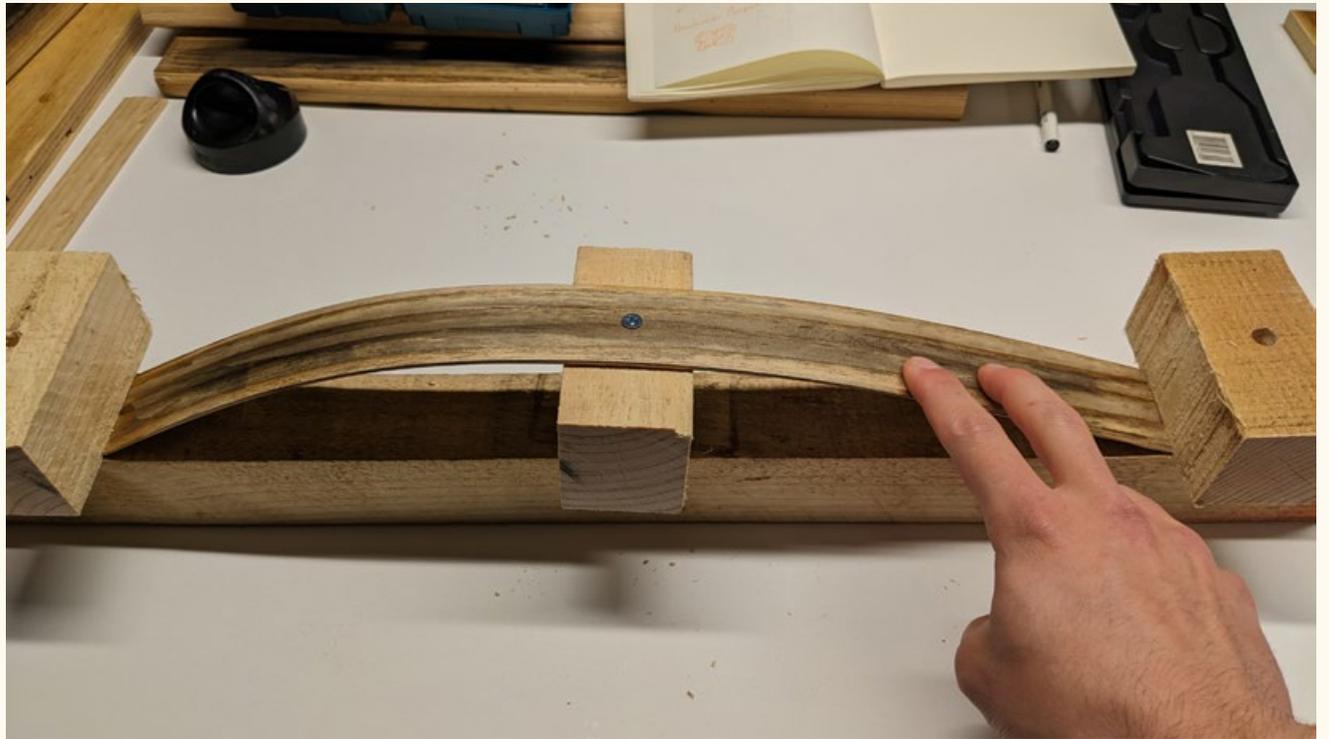
DENSIDAD: 0.512 g/cm³

↓ DENSIFICACIÓN

espesor: 2.3 mm prom
ancho: 40.5 mm
largo: 450 mm
peso: 39 g

DENSIDAD: 0.93 g/cm³

Ficha de registro de la evolución del espécimen.



Ensayos Prácticos

Terminación

Al ser el objetivo del proyecto el diseño de un mueble corresponde explorar el efecto de la aplicación de terminaciones sobre el material densificado, ya que ante la amenaza de la humedad sobre la estabilidad dimensional de la madera el tratamiento superficial con alguna pintura o aceite podría afectar negativamente el material.

Se prepararon cuatro probetas que serían sometidas a dos terminaciones distintas, Osmo Top Oil High Solid Transparente Mate y Rust Oleum Esmalte al Agua Negro Satinado. A dos muestras se les aplicó el aceite y a las otras dos se aplicó el esmalte, cada muestra fue cubierta por todas sus caras menos el extremo de sujeción y recibieron tres capas. El objetivo fue medir cambios dimensionales en la probeta luego de aplicada la terminación.

No hubo cambios dimensionales en las muestras luego de un secado ambiental de 48 horas. Esto es positivo para la potencial adopción del material y la flexibilidad que ofrece, ya que ante estos resultados preliminares el tratamiento con productos destinados a madera natural se puede traducir a la madera densificada y por tanto sus posibles aplicaciones no se ven deterioradas, además estas observaciones aportan seguridad para la aplicación de terminaciones al producto resultante del desarrollo del proyecto.



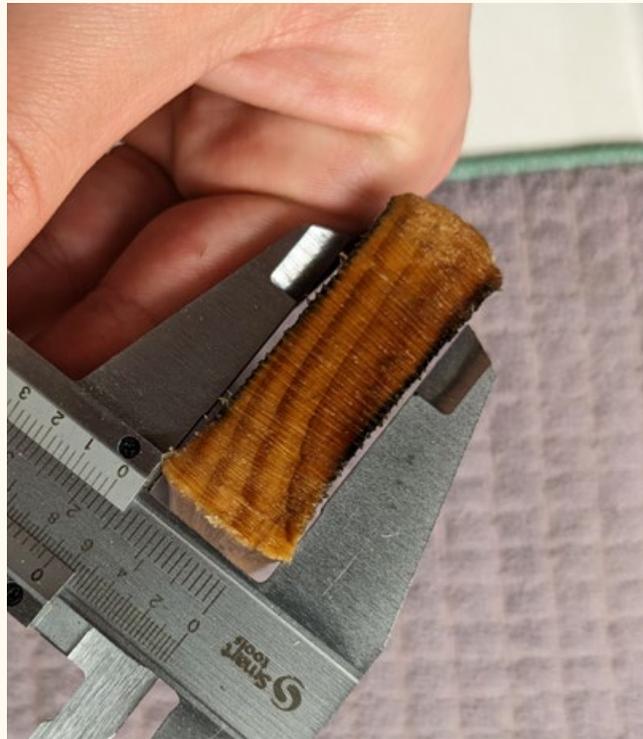
Ensayos Prácticos

Humedad - Inmersión Total

Otra prueba cuya realización era imperativa es el sometimiento de el pino radita densificado a agua. Se realizó una prueba de inmersión total de una probeta y otra prueba de inmersión parcial para medir y comprender la evolución dimensional de la muestra.

La inmersión total de la muestra evidencio cambios dimensionales casi inmediatos que evolucionaron de forma gradual con gran rapidez inicial que desaceleró hasta estabilizarse luego de una semana en que se detuvo el experimento. El carácter formal de la hinchazón es sumamente interesante, ya que adopta una forma de mariposa en que las puntas de cada sección se alejan del centro y el resto las sigue dando una curva a los lados de cada extremo longitudinal de la muestra, el grado de hinchazón tampoco es regular, la deformación más extrema ocurrió en el corte de la muestra que se mantuvo abierto durante el proceso de densificación, mientras que el otro extremo, que fue cortado para crear la probeta, es mucho menos susceptible a la deformación, aún compartiendo la misma morfología general.

La dirección de hinchazón también claramente responde a la dirección de compresión de la madera por lo que se expande en un solo plano o dos direcciones opuestas, algo que resulta obvio, pero es relevante para la experimentación en torno a la hinchazón como medio de fijación y modificación formal.

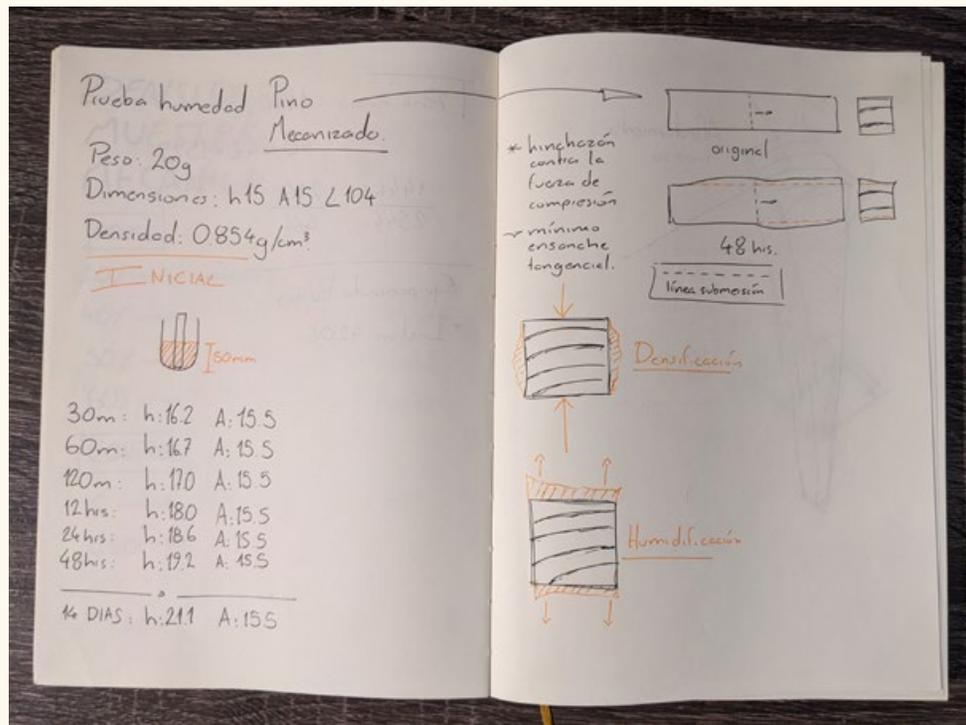


Ensayos Prácticos

Humedad - Inmersión Parcial

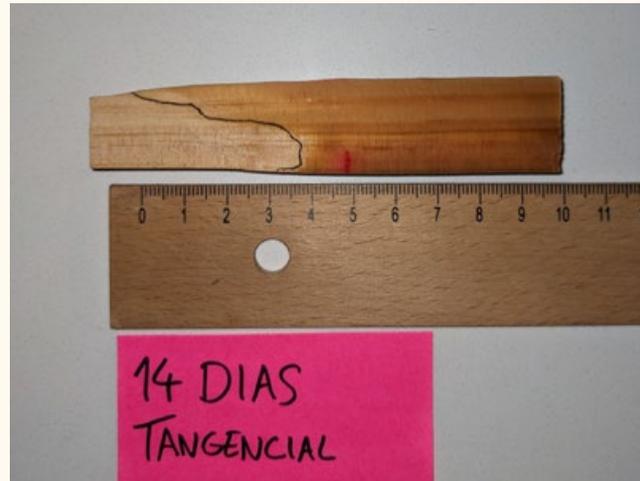
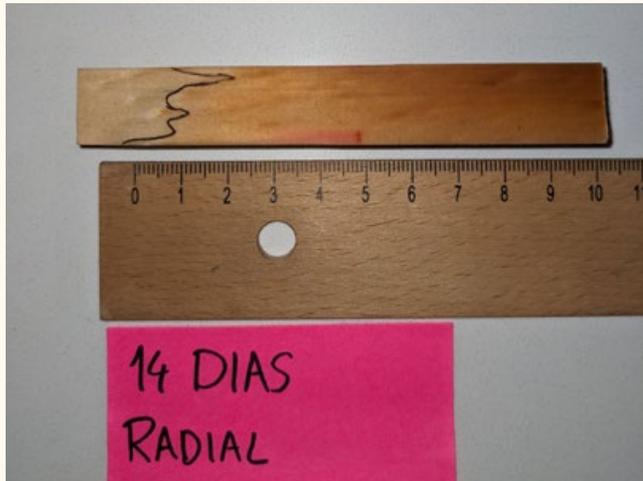
La inmersión parcial confirma el aspecto formal de la deformación, pero demuestra la dirección de esta de forma mucho más evidente, el ancho de la probeta que responde a la dirección tangencial de esta casi no sufre deformación y su evolución es nula, mientras la dirección radial en que fue comprimida la madera se expande significativamente para volver a su dimensión original.

También es interesante observar como el agua sube de forma irregular a través de la madera desde el segmento sumergido al espacio abierto lo cual evidencia los cuidados que se deben tener al someter el material al agua, pero también, ofrece un valor cosmético cautivador que puede ser una herramienta más en el diseño de productos con madera densificada.



Ficha de registro del ensayo.

La altura, es decir, la dirección de compresión se hinchó un 40% de su dimensión original en 14 días, mientras que el ancho solo sufrió una deformación del 3.3% en el mismo tiempo.



Evolución de la deformación de la madera densificada en el tiempo debido a inmersión parcial en agua, se llevó registro en: 30m, 60m, 120m, 24h, 48h y 14 días.

La indicación radial/tangencial explica la dirección respecto a la muestra en que se tomó la fotografía, se evidencia amplia deformación en la dirección de compresión.

Se pueden observar marcas en la muestra que detallan el crecimiento del agua a través de la fibra de la madera.

Caracterización Material

Estética del Pino Radiata Densificado

El pino radiata densificado no solo resulta más denso, sino que esta evolución es acompañada de una serie de transformaciones estéticas de la madera que alteran su significado y sugieren oportunidades de diseño y tratamiento formal. En general estas alteraciones estéticas van de la mano con el grado de reducción de volumen que sufrió la muestra, es decir que mientras más densa resulta la madera, se manifiestan los cambios estéticos con mayor fuerza.



El color es el cambio inmediatamente más visible, la madera adopta un color tostado más oscuro que da pistas del tratamiento térmico que sufrió la madera, al mismo tiempo resulta interesante que la madera se oscurezca ya que responde a la característica general de las especies de madera en que un color más oscuro y profundo es propio de maderas más densas y de lento crecimiento. De forma que el pino densificado no solo es más denso, sino que también lo aparenta.

El olor y terminación superficial de la madera también cambia, adoptando un aroma característico mucho más patente que el estado natural de esta, que, si bien no tengo el conocimiento para caracterizar con precisión, guarda relación con aromas tostados y se asimila de forma tenue al olor que emana del proceso de prensado con calor. La terminación superficial de la madera, además de ser más dura, adopta un brillo aceitado y experiencia táctil muy distinta al pino radiata natural, similar a maderas tropicales auto lubricantes, con tan solo un corte limpio se puede obtener una terminación lisa de baja fricción que aporta al atractivo del material y su potencial para mueblería y objetos de contacto.

La compresión radial del listón también acerca los anillos oscuros de crecimiento de manera que el aspecto más compacto de estos es equivalente a otras especies de madera, la habilidad de modificar el aspecto del grano final indica una oportunidad de modificación cosmética novedosa en el mundo de la carpintería e implementación de la madera.





De la mano con la compresión que acerca los anillos oscuros y modifica el aspecto del grano final, la cara lateral de la madera también sufre una deformación controlada en función de los anillos, resultando en un aspecto corrugado donde los valles corresponden al anillo oscuro y los montes al anillo claro. Este fenómeno tiene alto valor simbólico en la forma en que la madera pasa de una terminación lisa, producto del proceso industrial que otorga caras cepilladas, a una terminación irregular e informada por la misma composición del material, con un aspecto orgánico cercano a la madera en su estado natural. De esta manera, el proceso de densificación vuelve la madera de cierta forma a su aspecto original y crudo, venciendo el flujo habitual de procesos industriales y de modificación material que despojan la materia prima de cualquier semejanza a su estado natural. La utilización de esta terminación corrugada puede aportar valor formal y constructivo a productos, al mismo tiempo servir de indicador del proceso de densificación y el producto de ingeniería en madera resultante.





Al someter la madera a las mandíbulas calientes de la plataforma de densificación las caras de contacto del listón con la prensa resultan quemadas y se les imprime un patrón proveniente de perfil de acero. La terminación superficial resultante de la compresión es sumamente suave y no debe ser descartada solo por el efecto calcinado, este es representativo del proceso y puede ser incluido conscientemente en propuestas de diseño en madera densificada para, al igual que el detalle corrugado anteriormente, servir de indicador del proceso y presentarse orgulloso del proceso por sobre tratar de esconderlo.

Todos los aspectos descritos son insumos de diseño para el proyecto y propuesta de valor del material, el cual es mucho más que solo un perfil mecánico elevado y además ofrece oportunidades de manufactura avanzadas que permiten profundizar aún más en los factores estéticos mencionados. La densificación con moldes observada en el referente Under Pressure son el siguiente paso en la exploración formal del material y especialización del trabajo con el material. El desarrollo actual del proyecto no incorpora la exploración en torno a moldes por su alto costo de manufactura y el desafío técnico que significa el diseño del sistema de calefacción de estos para la densificación óptima del material.





Ensayos Mecánicos

Objetivos y Laboratorio DIMM PUC

Un objetivo principal del proyecto, que fue enunciado en la formulación, es realizar ensayos mecánicos al pino radiata densificado, ya que, si bien se cuenta con datos bibliográficos que informan al respecto, el proceso y materia prima tiene un alto impacto sobre el producto final por lo que es necesario comprender como se comporta el pino densificado específicamente a través del equipamiento diseñado para el proyecto, informando así la iteración de este y parámetros óptimos del proceso, sumada la caracterización mecánica del material para aproximarse apropiadamente a la construcción con este.

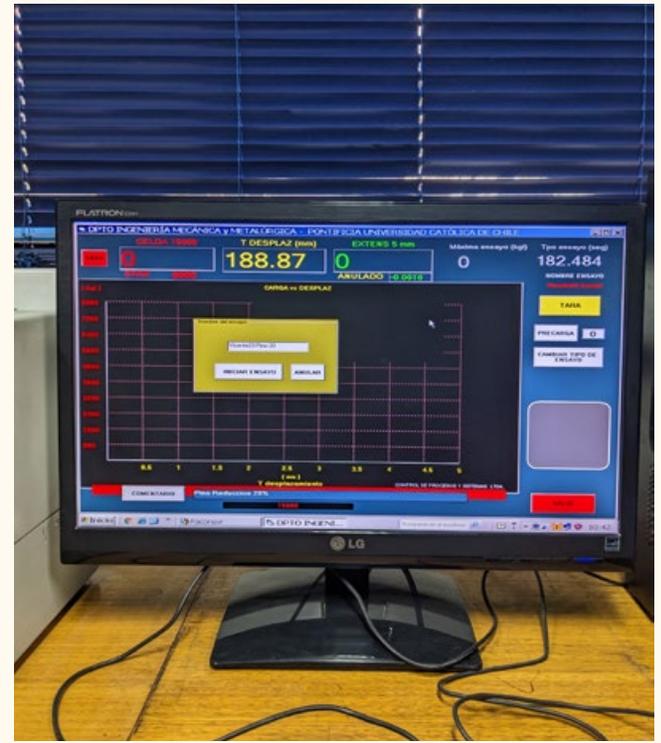
Los datos más relevantes para caracterizar el perfil mecánico de la madera es el módulo de elasticidad (MOE) y el módulo de ruptura (MOR), además de la dureza del material para cuantificar su mejora respecto al estado natural del pino y comprender oportunidades de aplicación en productos.

El módulo de elasticidad es el dato más ocupado para evidenciar la evolución mecánica del material en la bibliografía, su conocimiento es fundamental al momento de construir objetos con este material debido a varias razones clave. En primer lugar, el módulo de elasticidad, también conocido como módulo de Young, determina la capacidad de la madera para soportar cargas sin deformarse permanentemente. Manejar este valor es importante para el diseño ya que permite calcular con precisión las dimensiones adecuadas de las piezas de madera para garantizar una estructura segura y estable.

En segundo lugar, el módulo de elasticidad permite evaluar la resistencia y durabilidad de la madera ante tensiones y fuerzas externas, lo que es esencial para evitar posibles fallas o colapsos en la construcción. Conocer el MOE es relevante para construir objetos confiables, resistentes y seguros con madera, ya que permite garantizar el rendimiento y vida útil de un objeto e informar su dimensión mínima para el funcionamiento, permitiendo diseñar con un enfoque en la eficiencia del material.

Para la realización de los ensayos mecánicos se colaboró con el Departamento de Mecánica y Metalúrgica (DIMM) de la Pontificia Universidad Católica de Chile, quienes, en el marco de investigación académica en la universidad, ofrecieron acceso y apoyo en su laboratorio de forma gratuita para la realización de las pruebas.

Se realizaron seis ensayos de flexión de tres puntos para la obtención del MOE y MOR de muestras de pino natural y densificado en distintos grados, además de tres ensayos de dureza Brinell en pino radiata control y densificado.



Ensayos Mecánicos

Resultados y Reflexión Crítica

Los resultados indican que el pino natural o control tiene un mayor MOE que la contraparte densificada, esto es contrario a la bibliografía y experiencia práctica con el material, ante esto los valores obtenidos resultan extraños y de baja fidelidad. Según lo indicado por los resultados del ensayo en términos prácticos, la madera densificada es menos rígida y resiste a la flexión que el pino radiata natural, esto resulta sumamente contrario a la experimentación práctica con la madera densificada que, en la misma dimensión, es mucho más estable que su contraparte natural y posibilita formatos que no son viables con el pino natural.

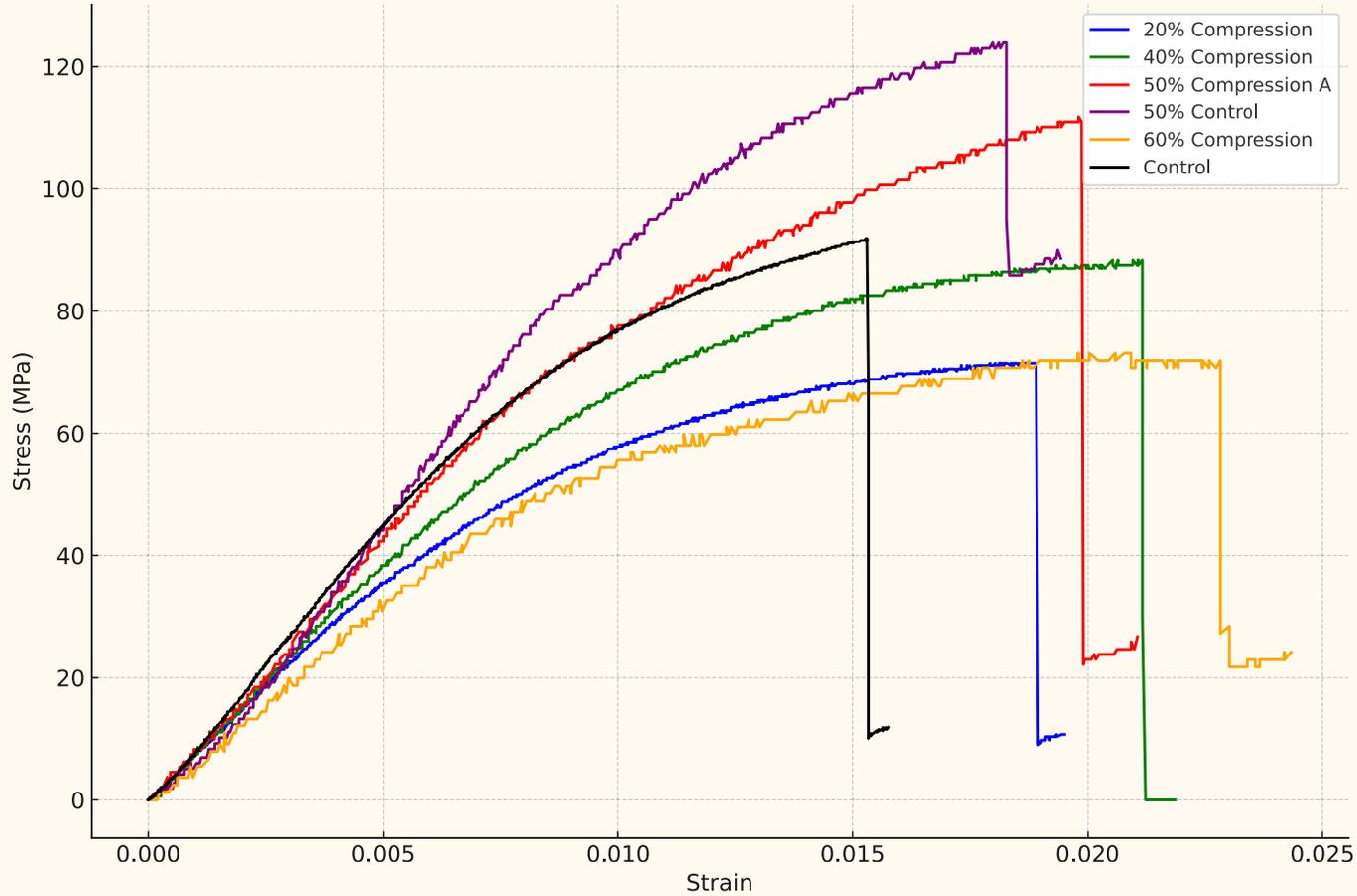
Esto se conversó con el profesor a cargo de los ensayos e indicó que fueron hechos de forma correcta y tan solo sería necesario realizar un mayor número de estos para reforzar la fidelidad del dato. Por lo tanto, si bien no se obtuvieron los datos esperados en torno al MOE y MOR, la curva de esfuerzo-deformación obtenida del ensayo sugiere una región elástica superior de la madera densificada, es decir, que esta puede soportar un mayor grado de deformación previo al fallo, indicando que la madera es más dúctil y puede servir para aplicaciones donde se prefiere la resiliencia al fallo del material por sobre la resistencia máxima a la flexión.

El ensayo de dureza se realizó acorde al método Brinell, se midió una muestra control de pino natural y dos muestras densificadas al 60% y 65% compresión. Los resultados indican que la madera densificada alcanza una dureza 2.6 veces superior a la madera natural, es decir un incremento de 167% de dureza, confirmando que la madera densificada es multiplicativamente más dura y por ende resistente a la deformación producto de la manipulación y golpes.

TABLA 1: Resultados ensayo flexion

MUESTRA	MOE (MPa)	MOR (MPa)	HB (62,5/5,0)
Control	1134,7	83,85	5,20
Control 50%	1263,5	124,0	
Reducción 50%	1063,9	111,8	
Reducción 20%	922,2	71,6	
Reducción 40%	967,7	88,4	
Reducción 60%	817,6	73,2	13,89
Reducción 65%			9,26

Tabla de resultados finales entregada por el DIMM. Indicando MOE, MOR y dureza Brinell.



Curva combinada de esfuerzo-deformación. Elaborada con asistencia de Chat-GPT 4.0 + Code Interpreter, julio 2023.

Por encima de esto los resultados confirman la teorización práctica en torno al límite óptimo de densificación mencionado anteriormente. La medición de dureza de la muestra densificada al 65% fue menor a la de 60%, si bien no es suficiente para plantear una conclusión final, esto se puede explicar por las fracturas tanto superficiales como internas que sufrió la muestra de 65%, afectando la dureza de la madera. Pone en evidencia el límite de estabilidad del 60% y por tanto asegura el marco óptimo de densificación para posteriores ciclos y la preparación del material para la fabricación del mobiliario experimental.

Más allá de los resultados de los ensayos la experiencia en sí es relevante para el desarrollo del proyecto y familiarización con la ciencia de materiales, un proyecto como este y su continuación requiere de un volumen mucho mayor de testeo y trabajo interdisciplinario con profesionales ligados a la ingeniería y estudio de materiales que se desenvuelven a contextos ajenos a la formación en diseño.

Ensayos posteriores se deben hacer con un mayor número de muestras para pulir anomalías puntuales y generar correlaciones entre los parámetros de densificación, es decir, temperatura, presión, tiempo de inmersión, tiempo de prensado, etc., para precisar la densificación óptima del material en función de su desempeño mecánico.





TIMBERMAC

CEPILLADO 1x2x3.20 m
200 PZS

TIMBERMAC

CEPILLADO 1x2x3.20 m
100 PZS

TIMBERMAC

CEPILLADO 1x4x3.20 m
132 PZS

TIMBERMAC

CEPILLADO 1x4x3.20 m
132 PZS

TIMBERMAC

2x2x3.2m
DIMENSIONADO-SECO 120 PZS

TIMBERMAC

CEPILLADO 1/2x4x3.20 m
324 PZS

TIMBERMAC

CEPILLADO 1/2x4x3.20 m
324 PZS

desarrollo

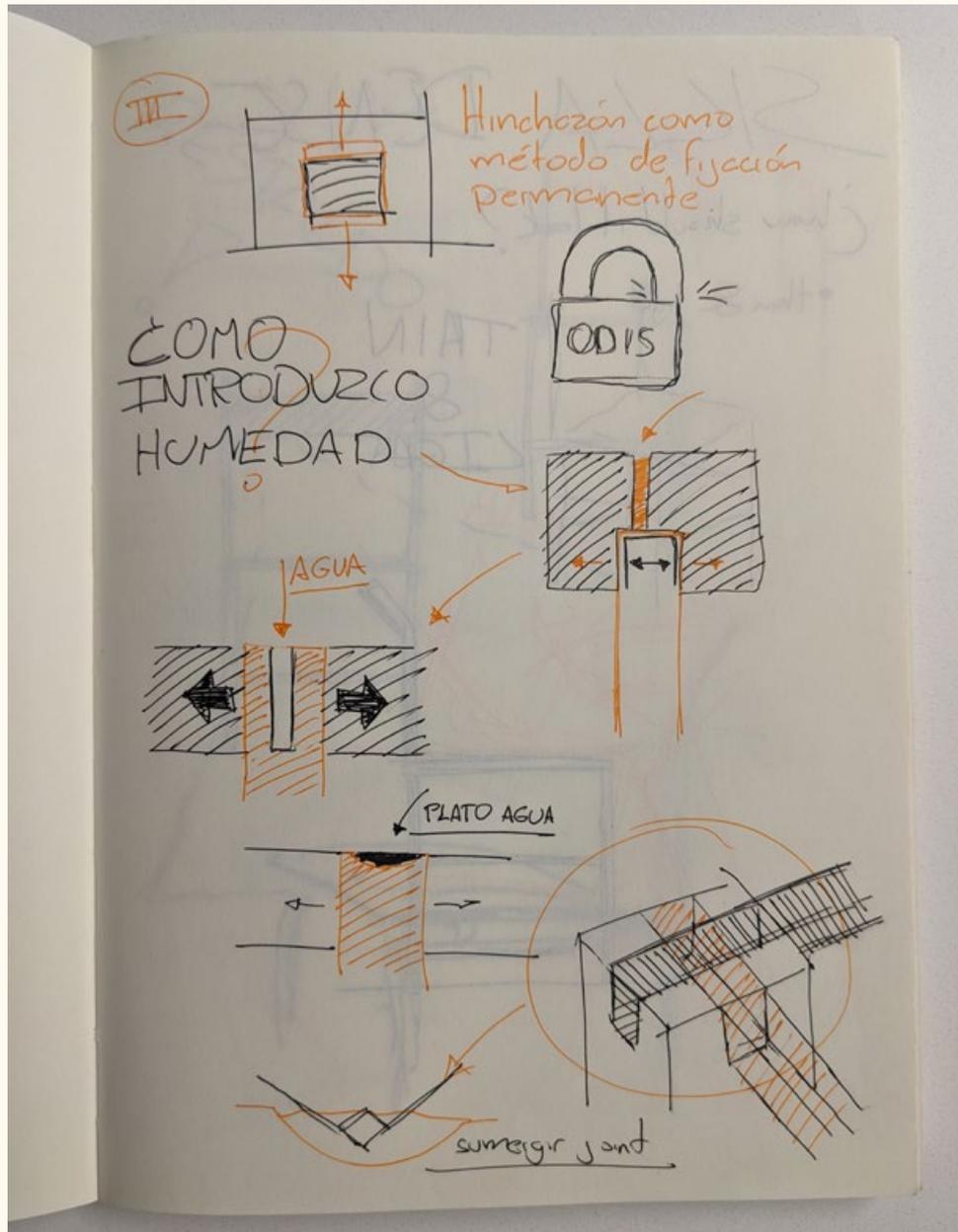
Aproximación al Diseño de Mobiliario

Conceptualización

La conceptualización del mueble se dirigió inmediatamente a una silla por diversos factores. En primer lugar, la silla representa el mayor desafío constructivo de la mueblería y se ha posicionado como un objeto de diseño de culto con vasta experimentación e historia que sirven de insumo para el diseño de una nueva silla y concentra un alto grado de interés al tratarse de un objeto ubicuo reconocible por todos. Segundo, mi interés personal por las sillas como objeto de diseño nutre la motivación por el proyecto, sumado que tengo algo de experiencia en el diseño y fabricación de sillas.

En tercer lugar, en relación con lo mencionado anteriormente, la silla es el mueble más sujeto a estrés, manipulación, frecuencia de uso y fuerzas. El diseño de una silla es complejo y debe tener una alta tolerancia física, históricamente la silla suele ser el objeto piloto de innovación material, técnica y constructiva en el diseño de muebles. Por lo tanto, la madera densificada que promete un mejor desempeño mecánico debe ser enfrentada al mayor desafío mecánico para acelerar el descubrimiento de sus bondades y limitantes, plasmar el material en una silla lo permite, y al mismo tiempo, por el carácter protagónico e histórico de la silla, sirve como un gran medio de exhibición de la madera densificada.

Finalmente, también permite plantear un contraste con el pino radiata natural, madera que se evita para la fabricación de sillas por su bajo valor estructural, cosmético y simbólico. Fabricar una silla de pino radiata densificado pone en evidencia la evolución del material y permite replantear su abanico de usos.



Para la conceptualización inicial de la silla se reconocieron dos caminos, en primer lugar, la experimentación formal con la madera en torno a la hinchazón como mecanismo cosmético y de ensamble, en segundo lugar, la implementación de la madera en su mínima expresión con un enfoque en el desempeño mecánico más eficiente en función del peso de la silla.

Se desarrollaron conceptos de ensamble y forma en torno a la humedad para el diseño de la silla, pero el carácter relativamente volátil de este comportamiento sumado la complejidad del mecanizado y acotado tiempo de desarrollo restante se optó por el segundo camino orientado al peso y eficiencia material. De todas formas, el primer camino es una avenida digna de explorar en la continuación del proyecto ya que abraza la dimensión más plástica del diseño y se puede formular gran interés formal y constructivo.

Diseño de la Propuesta

Objetivos y Desarrollo Conceptual

Para el camino de la eficiencia material en el diseño de la silla se plantearon los siguientes objetivos:

La silla se debiera percibir como imposible, por la delgadez de sus miembros.

La silla debiera plantearse en su mínima expresión, sin acrobacias formales ni elementos protagónicos, se debiera ver como —el dibujo de una silla—.

La silla debiera tener un peso menor a 2500 gramos, lo cual le permite entrar al espectro de sillas ultralivianas que brillan por su inteligencia constructiva y material.

Todo esto se debiera lograr y resultar en una silla capaz de funcionar normalmente.

Estudio y comparación de la silla del proyecto y sillas clásicas.
De izquierda a derecha: silla Panton, silla Wishbone, silla proyecto, Superleggera, silla Standard.

Para lograr estos objetivos se decidió trabajar con una sola sección de madera cuadrada, esto permitiría homogenizar el lenguaje constructivo y mantener la pureza asociada a la mínima expresión de una silla. Se determinó trabajar con una sección de 16x16mm ya promete una percepción inusualmente delgada, es suficientemente fuerte para servir de pata y estructurar la silla y además el número 16 tiene un valor simbólico personal asociado a mi fecha de nacimiento, 08.08.1999, que fue facilitador de la toma de decisión en torno a la sección y armoniza con el trabajo personal en que se enmarca el proyecto.

Se estudiaron las medidas generales de cuatro sillas clásicas para la toma de decisiones en torno a la altura de sentado, altura del respaldo, profundidad del asiento, inclinación del asiento e inclinación del respaldo.



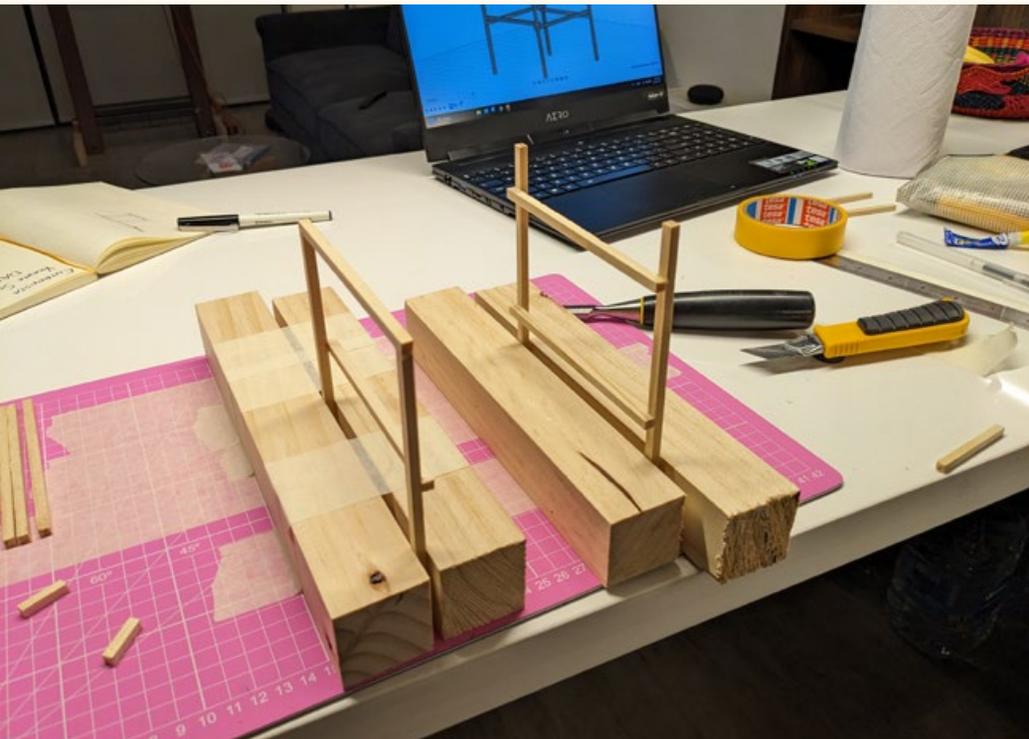
Marco elaborado para probar la resistencia de una pata de madera densificada de sección 16x16mm.



Se plantearon reglas constructivas para mantener la silla en su mínima expresión sin elementos que sobresalgan visualmente o quiebren el lenguaje constructivo. Se trabajaría exclusivamente con ángulos rectos y el empalme superficial de los elementos, cuidando que ninguno de estos escape el volumen central marcado por las cuatro patas, además todas la separación o interacción dimensional entre los elementos se haría en distancias milimétricas que fueras múltiplos de cuatro.

En torno a esto se diseño el marco estructural de la silla para que fuera capaz de incorporar los ángulos y medidas necesarias para la interacción apropiada de sentado y simultáneamente se respetaran las reglas constructivas planteadas.

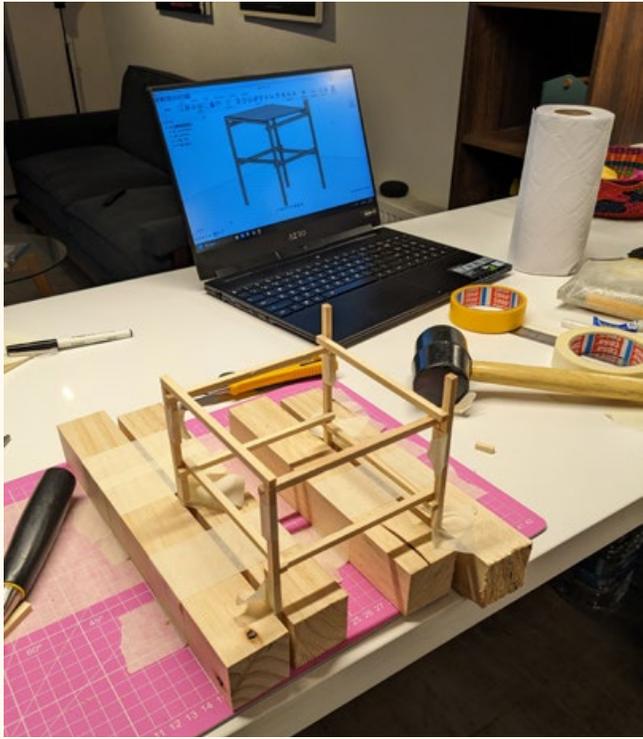
Se decidió incorporar terciado de abedul de 4mm para la fabricación del asiento y respaldo de la silla ya que ante las restricciones dimensionales del sistema de densificación y escaso tiempo de desarrollo no era viable explorar en profundidad posibilidades de estructura laminar para estas partes de la silla. El terciado de abedul respondía apropiadamente a requisitos estéticos y mecánicos para su incorporación en el diseño de los apoyos de la silla.



Diseño de la Propuesta Maqueta

Una vez solucionado el lenguaje constructivo general y disposición de los elementos de forma digital, se desarrolló una maqueta para comprobar espacialmente el aspecto de la silla.

La maqueta escala 1/3 sirvió para validar el aspecto de la silla y dar seguridad de que se estaba logrando la percepción delicada e —imposible— del objeto. La manufactura de la maqueta también dio luces de la dificultad constructiva que plantea el diseño de la silla en función de su orden y técnica de ensamble, además sirvió para reconsiderar la proporción del respaldo en función del asiento y su debido posicionamiento.

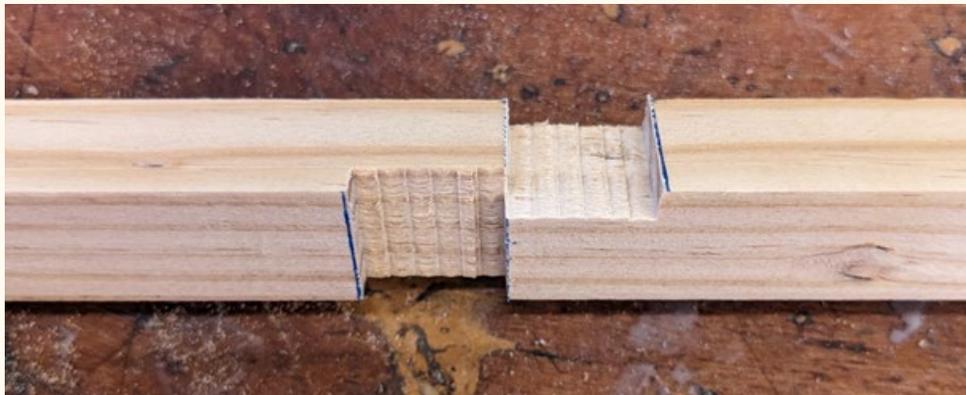


Diseño de la Propuesta

Iteraciones y Pruebas de Ensamble

Inicialmente el empalme de los elementos cruzados de la silla fueron pensados como puramente superficiales, es decir, como la maqueta, los elementos que estructuran la silla solo se pegarían entre sí con adhesivo sin ningún tipo de encaje que sitúe la pieza o la sostenga, esto si bien aporta limpieza al lenguaje constructivo de la silla, genera grandes dificultades de ensamble ya que se debe posicionar cada elemento cruzado sin ningún soporte físico que lo sostenga en su lugar, y además, presenta graves inquietudes respecto a la resistencia de la uniones que dependerían puramente de la fuerza del adhesivo. Esto no era compatible con los objetivos de la silla ya que no podía ser el caso que la silla fallara por su ensamble y no por la calidad de la madera densificada.

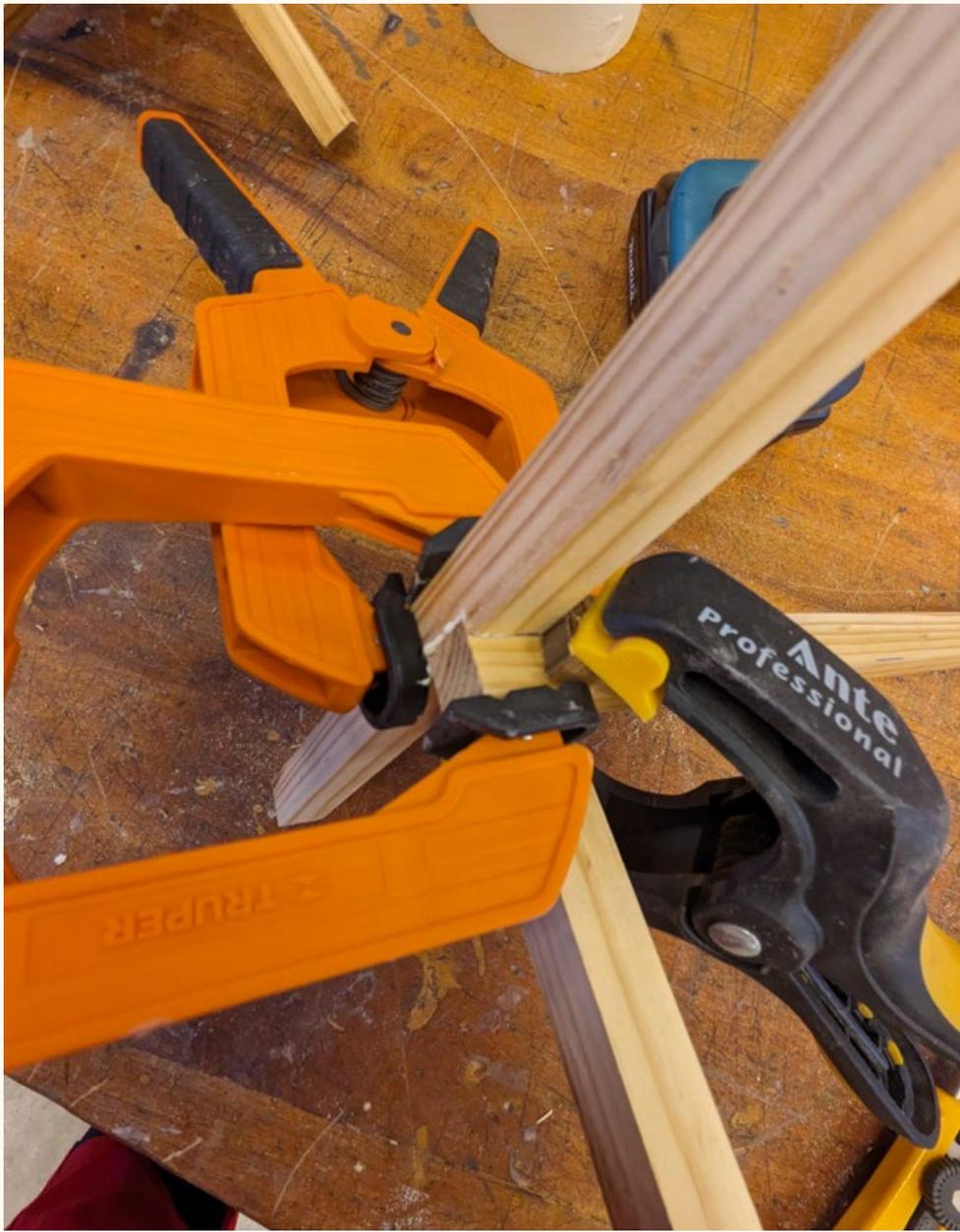
Por esto se decidió incorporar encajes sutiles de 4mm de profundidad en cada empalme y así asegurar la fuerza de cada uno y facilitar el ensamble de la silla sin afectar el aspecto general validado en la maqueta. El único problema generado por este cambio fue que resultaría en que el poste del respaldo quedaría parcialmente colgando ya que el elemento cruzado que lo soporta habría retrocedido 4mm, lo cual quebraría la regla constructiva planteada y el aspecto de la silla.





Se solucionó mediante un corte diagonal sutil que elimina el desfase de 4mm, este fue homologado a la punta de la pata trasera para mantener el detalle en armonía. Si bien era un pequeño desvío del aspecto ortogonal estaba apropiadamente contenido en el corazón de la silla y no competía ni forzaba a demás elementos a asimilarlo. Finalmente sirve como el único detalle constructivo que aporta interés visual por sobre la articulación de los demás elementos sin robarse el escenario.

Se desarrollaron varios ensambles de prueba para validar el sistema de encaje ideado y constatar la robustez de la estructura, el último recurso, por si el encaje no era suficiente, sería la incorporación de pequeños tornillos en cada empalme. Esto no era ideal ya que quebraría el espíritu del diseño orientado a el desempeño exclusivo de la madera densificada, finalmente su incorporación no fue necesaria.



Manufactura de la Propuesta

Desafíos y Aprendizaje

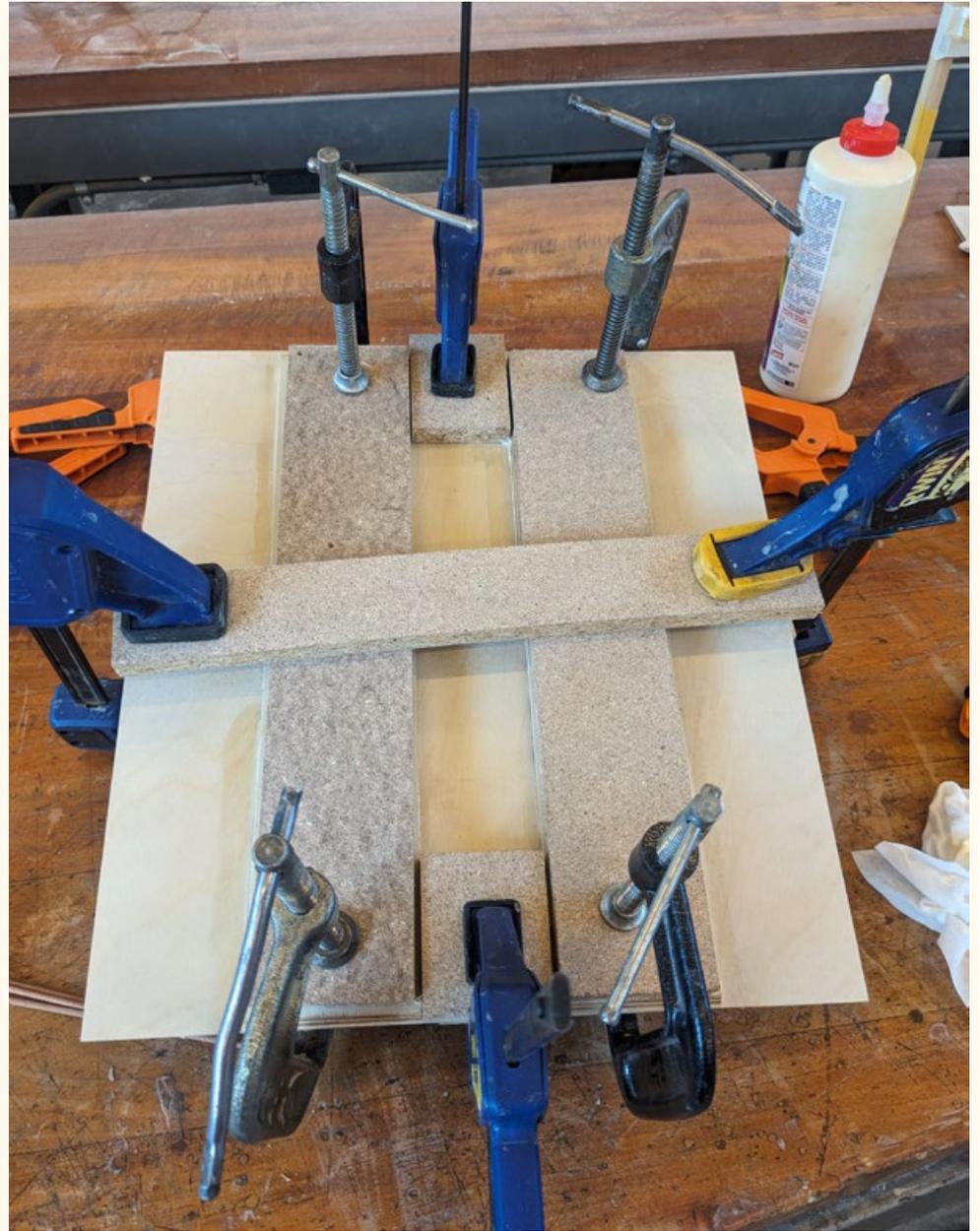
Una vez iterado el modelo digital de la silla con los ensamblajes y detalles previamente descritos se dio paso a la fabricación de la silla. La principal precaución fue escoger de forma específica cada elemento cruzado según su densidad para aplicarlo en partes de mayor y menor estrés a través de las 16 piezas de la silla. Los elementos críticos fueron las patas y los travesaños sobre los que descansa el asiento por lo que se destinaron las piezas más densas a aquellos lugares.

Esto, ya que, si bien cada listón original ocupado para la fabricación de la silla fue llevado a una densificación de aproximadamente 50%, algunos resultaron más densos debido a una densidad original más elevada o una reducción de volumen superior sin quiebre de fibra.

	Pata				Poste Respaldo		Travesaño Respaldo*		Apoyo Asiento		Elemento Cruzado					
	FRONT LEFT	FRONT RIGHT	BACK LEFT	BACK RIGHT	LEFT	RIGHT	TOP	LOW	FRONT	BACK	FRONT	BACK	LEFT TOP	RIGHT TOP	LEFT LOW	RIGHT LOW
DENSIDAD [g/cm ³]	0.781	0.799	0.905	0.937	0.932	0.921	0.850	0.742	1.201	1.055	1.074	1.045	0.752	0.752	1.016	0.947
PESO [g]	88	90	113	117	84	83	87	76	123	108	110	107	77	77	104	97
VOLUMEN [cm ³]	112.640	112.640	124.928	124.928	90.112	90.112	102.400	102.400	102.400	102.400	102.400	102.400	102.400	102.400	102.400	102.400
ALTO [mm]	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
ANCHO [mm]	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
LARGO [mm]	440	440	488	488	352	352	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400

Tabla de registro de cada elemento que compone la estructura de la silla.

Para informar el proceso de diseño, evolución del objeto y evidenciar el potencial de customización aportado por la densificación de madera.



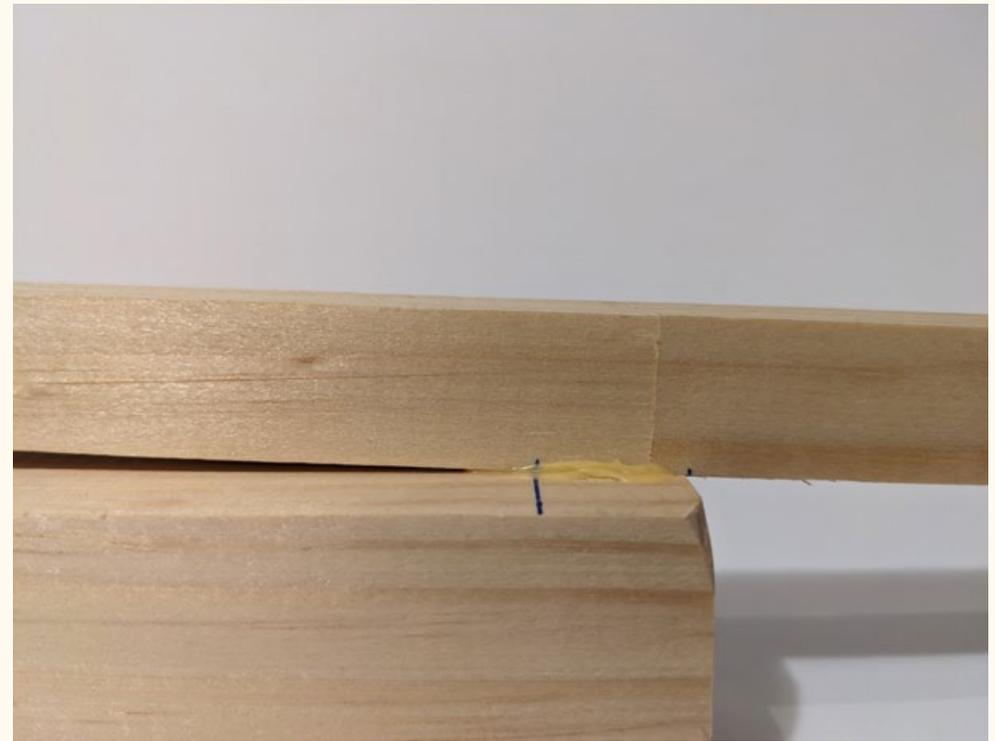
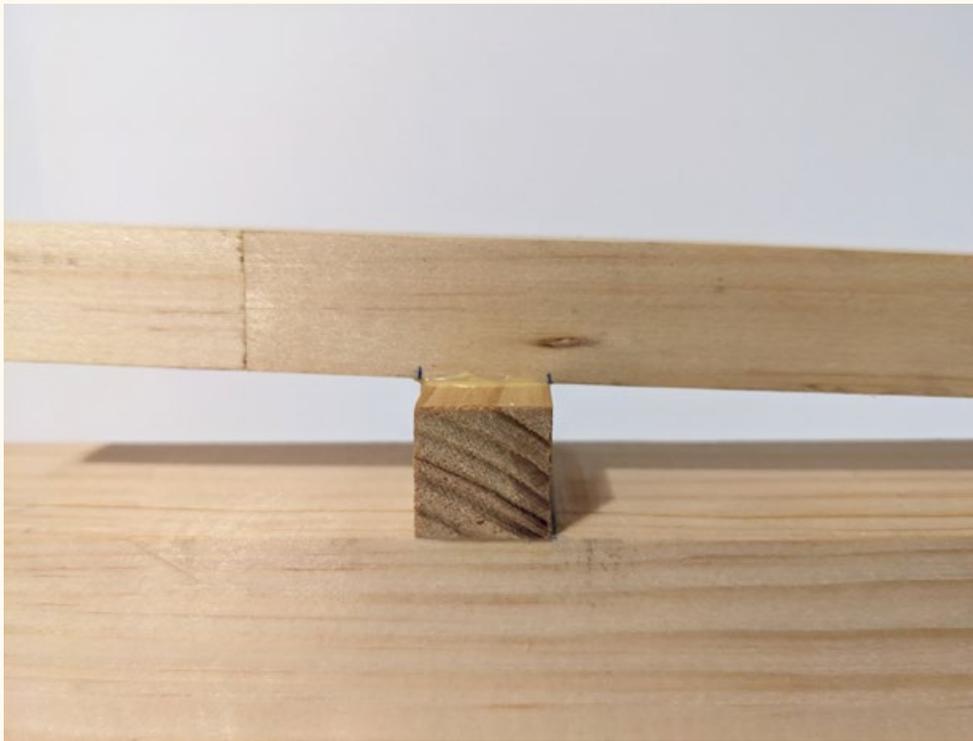


Este fenómeno de escoger cuidadosamente la materia prima para cada parte de un mueble no es nuevo en el mundo de la carpintería, pero la oportunidad que la densificación ofrece para crear perfiles de densidad a medida para cada caso de uso desde una misma materia prima original es sumamente cautivadora y aporta valor a la madera densificada en el mundo de la mueblería. No solo se puede mejorar una madera antes despreciable, sino que se puede alterar específicamente para servir distintas implementaciones.

Además se tomó la decisión de exponer la cara quemada de producto de la densificación en la cara exterior de los postes del respaldo, de esta manera abrazando los orígenes de la materia.

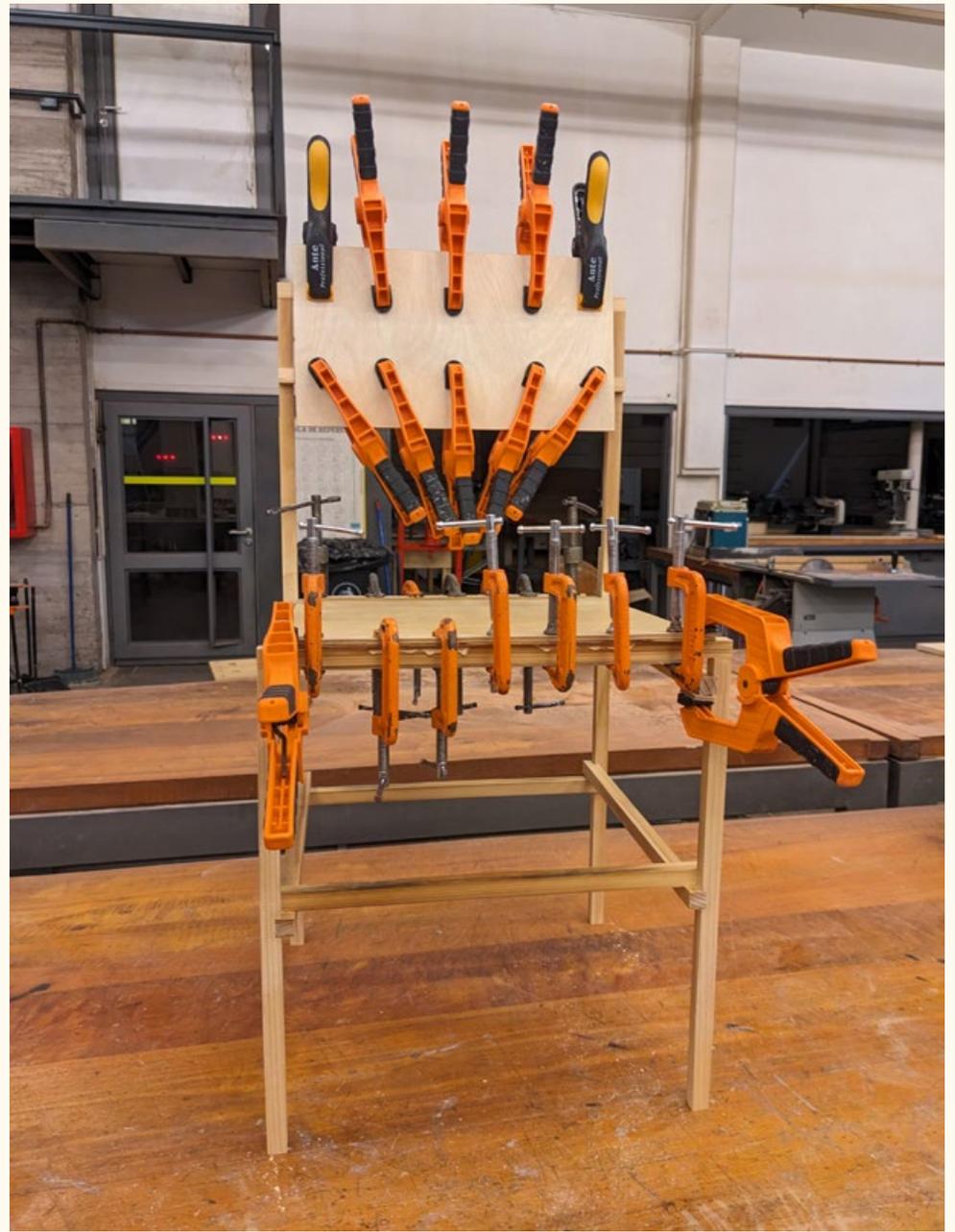
La fabricación de la silla avanzó sin problemas, pero el ensamble del asiento presentó una inquietud que debió ser verificada con un ensayo paralelo. El asiento lleva una leve pendiente de 2.5° en referencia al suelo, por lo que su ensamble directo sobre los travesaños cuya cara superior es paralela al suelo deja un pequeño margen donde el contacto entre el asiento y esta cara no es plano. Por miedo a que esto resultara en un ensamble débil entre ambas piezas se construyó una prueba para simular esta situación y comprobar si tan solo rellenar este margen con adhesivo es suficiente para un ensamble seguro, ya que un generar un corte de precisión de 2.5° en el travesaño no era viable. Afortunadamente el ensayo dio buenos resultados y el posterior ensamble del asiento resultó sin problemas.

El proceso de fabricación culminó en dos grandes etapas de encolado, el ensamble de todos los elementos cruzados que componen el marco de la silla, y luego el acople del respaldo y el asiento a este. La manufactura de la silla y el tiempo en el taller fue un proceso ameno que esperaba con ansias desde que comenzó la etapa de investigación. Pude satisfacer mi pasión por la interacción física con la materia de la mano con el desarrollo del proyecto y la familiarización con la madera densificada.



Ensayo de adhesión en pendiente.





**silla
D01**



A wooden chair is shown from a side profile, with a light-colored wooden sign attached to its backrest. The sign is rectangular and has a thin wooden strip along its top edge. The chair's legs and backrest are made of light-colored wood. The background is a plain, light gray.

la primera silla de madera densificada del mundo

probablemente



La Propuesta

Usabilidad y Desempeño

La silla logra cumplir con los objetivos planteados, con un peso de 2315 gramos, es una silla sumamente liviana que compite con íconos del diseño como la Superleggera de Gio Ponti. Además, logra mantener una estructura estable con los elementos cruzados de una sección inusualmente reducida, responde a la mínima expresión de una silla sin ser genérica o descuidada en su diseño. El elemento crítico de la silla es el respaldo, que flexa más de lo ideal y pone en riesgo la integridad de la silla. Aún así puede soportar un adulto y sirve como una exitosa primera iteración.

Se logra constituir una silla estructurada exclusivamente por pino radiata densificado con un enfoque en la eficiencia material donde cada elemento trabaja y pone en evidencia la evolución mecánica de la madera, siendo imposible estructurar la silla con pino radiata natural en las mismas dimensiones.

Si bien se percibe frágil al interactuar con ella, la silla D01 sirve para demostrar el potencial de la densificación para llevar una madera de bajo valor social y estructural como el pino radiata a un producto sofisticado y un contexto de aplicaciones impensadas para el material original.



Respecto al eslogan de —la primera silla de madera densificada del mundo— se basa en la investigación sobre productos de madera densificada, no se detectó ningún proyecto de mobiliario o silla debidamente documentada que fuera construida con madera densificada, naturalmente la afirmación no se puede asegurar fehacientemente, pero no hay dudas de que al menos, la silla D01, es de las primeras sillas u objetos de mobiliario en general que se han producido en madera densificada sólida, obtenida a través de un proceso termo-hidro-mecánico al contrario de densificación por impregnación.

La silla D01 en su espíritu más elemental sirve para decir:

**mira lo que se puede
hacer con madera
densificada**

Futuras Iteraciones

D01 y Productos en Madera Densificada

Futuras iteraciones de la silla en sí tienen que ver con la reconfiguración del ensamble del respaldo para prevenir su flexión exagerada y otorgar mayor seguridad al uso de la silla, al mismo tiempo es posible que el anillo inferior de elementos cruzados que estructuran las patas se puedan modificar para hacer más eficiente su trabajo con menor cantidad de material. Otro punto que merece ser iterado son los apoyos en función de su confección material, ya que en su estado actual aportan más de 600 gramos de peso y esto se puede reducir drásticamente con otro material o un sistema tensado.

La silla D01 no trata de sí misma, sino que pretende exhibir las bondades y oportunidades que emanan de la madera densificada para el diseño de productos. Iteraciones hermanas de la silla no necesariamente deben ser sillas también, sino que los aprendizajes de esta se pueden traducir a todo tipo de productos diseñados desde esta materia prima.

Como fue planteado anteriormente, existe un amplio espectro de oportunidades de diseño de producto con madera densificada incorporando lógicas asociadas a la hinchazón y al moldaje, la silla D01 es tan solo una aproximación al uso de esta madera desde una perspectiva ingenieril con gran atención por la eficiencia material y desempeño mecánico de sus partes, futuras iteraciones pueden aunar todas estas lógicas y conceptos para desarrollar productos que abrazan la sustentabilidad, innovación y bondades propias de la madera densificada.



Fijación Mecánica

Hinchazón de la Madera y Lógica Tarugo

La hinchazón del pino radiata densificado como método de fijación mecánica no alcanzó a ser estudiado profundamente en el marco del proyecto. Se estudió el comportamiento del material ante agua y se realizaron ensayos iniciales en torno a tarugos de madera densificada con resultados positivos de retención. Estos ensayos indican un futuro favorable del concepto y merecen ser estudiados en mayor profundidad. El mecanismo de tarugo hinchado de madera densificada no solo puede servir de forma aislada, sino que también puede complementar los avances en dowel laminated timber (DLT), técnica de ensamble de grandes vigas de madera que utiliza solamente tarugos, ya que la tendencia de la industria de productos de ingeniería en madera apunta al abandono de adhesivos nocivos para la salud y medioambiente en pos de soluciones sostenibles.

Futuras iteraciones de este concepto deben considerar mediciones de retención y plantearse geometrías óptimas para la fijación mecánica, además de estudiar en profundidad el impacto de la dirección de hinchazón y los parámetros óptimos para favorecer el crecimiento de la madera ante la humedad, ya que como se discutió anteriormente se llevaron a cabo los procesos para asegurar la mayor estabilidad dimensional posible del material en función de su aplicación en productos, mientras que para su aplicación en lógicas de fijación mecánica estos procesos deben priorizar lo contrario.



Probetas de ensayo hinchazón tarugo para retención mecánica.

Identidad Gráfica

Aproximaciones al Diseño de Marca

logotipo

dense

Se llevó a cabo un ejercicio de diseño, en donde se ideó una marca e identidad gráfica para el proyecto. Si bien dicho proyecto se enmarca en un contexto más bien experimental-investigativo, se realizó este ejercicio con el fin de entender cómo se percibiría esta marca; si eventualmente se decidiera diseñar una línea de productos de madera densificada.

La identidad gráfica de este proyecto busca representar las características de la madera densificada, puestas en valor en este proyecto de título. Se busca seguir la misma línea representada en las páginas de esta memoria, algo clásico y semi-formal, con dejes de modernismo y contemporaneidad.

Identidad Gráfica

Fuentes Tipográficas

display

Aventine

cuerpo

Adobe Garamond Pro Regular

datos

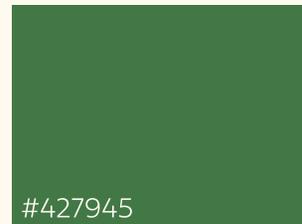
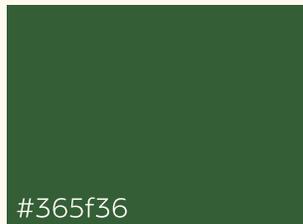
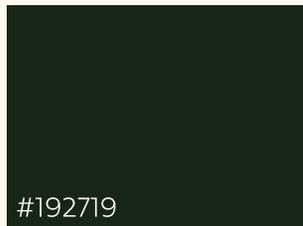
Fieldwork Geo Thin

detalles

Garamon(d/t)

Identidad Gráfica

Paleta Cromática



La elección cromática hace referencia al entorno natural en el que se encuentra el pino radiata y las asociaciones culturales o simbólicas que tiene el color verde. La elección de colores verdes en la paleta es una forma de conectar visualmente el diseño con el material que se en el proyecto, creando una cohesión temática. Además, el verde también es un color que se asocia con la industria forestal y la silvicultura. Utilizar tonos de verde en el diseño transmite una sensación de autenticidad y conexión con la tradición y la historia relacionada con la madera.

Los colores morado oscuro y lila rompen con el esquema rústico impuesto por los cuatro tonos de verde, y otorgan una sensación artificial, alejada de lo campestre y natural. Sirven en términos prácticos para acompañar a los tonos verdes y dotar al proyecto de un dejo de contemporaneidad y modernidad.

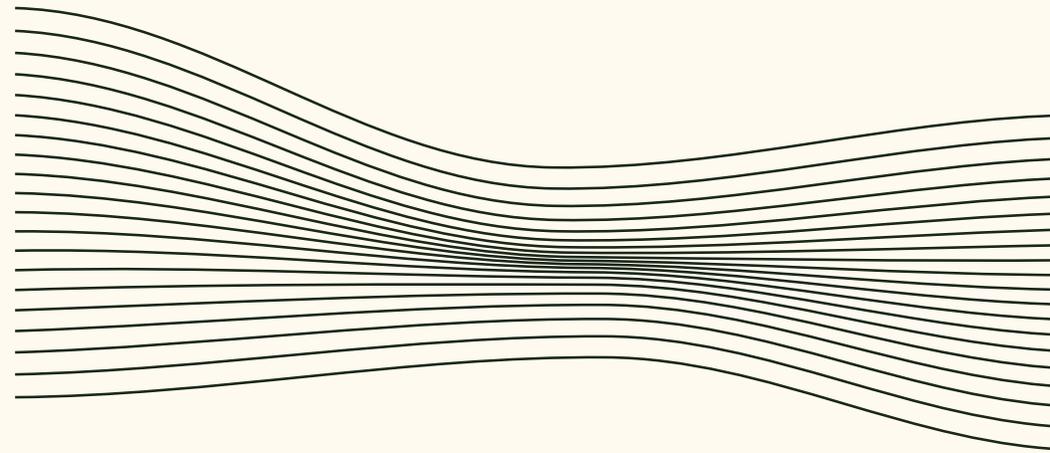
Por último, el color hueso otorga un fondo limpio, sin percibirse como vacío. Este tono claro se convierte en el *canvas* perfecto para enmarcar la propuesta cromática.

Identidad Gráfica

Recursos Complementarios

Como recurso gráfico se utilizan líneas que aluden a la veta de la madera siendo comprimida. Las líneas horizontales tienden a transmitir una sensación de estabilidad y solidez. En el contexto de este proyecto que trata la densificación de madera, se busca resaltar las ventajas de este proceso para fortalecer y mejorar la madera, las líneas horizontales simbolizan visualmente esta idea de mayor resistencia y firmeza. Así mismo, las líneas horizontales pueden utilizarse para representar visualmente cómo se compacta y refuerza la estructura de la madera durante el proceso de densificación. Esto puede ayudar a hacer el tema más comprensible y accesible para el público del proyecto.

Las líneas horizontales también evocan la imagen de los anillos de crecimiento de los árboles, que son una característica natural intrínseca de la madera y está asociado a su edad y tradición. Al utilizar líneas horizontales, se puede establecer una conexión gráfica con la materia prima utilizada en el proyecto, reforzando el enfoque en la madera como material natural y renovable.



CLP 502,008

ítem	unidades	precio	proveedor
Gata Hidraulica	1	CLP 33,991	Mercado Libre
Hilo 1mt 1/2 BSW	2	CLP 16,580	Sodimac
Tuerca 1/2 2u	8	CLP 5,688	Sodimac
Golilla 1/2 3u	6	CLP 4,140	Sodimac
Perfil 80x40-4	1	CLP 62,740	Acercord
Anticorrosivo 1L	1	CLP 11,000	Sodimac
Cocina Portatil	1	CLP 7,503	Mercado Libre
Tetera 3L	1	CLP 7,920	Mercado Libre
Calefactor Silicona	4	CLP 91,976	Aliexpress
Terciado 15mm	1	CLP 20,890	Sodimac
Perno Inox 5/16 2" C/T 2u	2	CLP 4,180	Sodimac
Golilla Inox ancha 5/16 2u	2	CLP 5,180	Sodimac
Golilla Inox 5/16 2u	2	CLP 1,780	Sodimac
Tuerca 1/2 2u	3	CLP 7,470	Sodimac
Golilla ancha 1/2	3	CLP 2,400	Sodimac
Prensaestopa PG21	4	CLP 3,236	Gobantes
Resortes Inox	8	CLP 9,600	Resortes Madrigal
Mangueras Goma	2	CLP 7,400	Casa de la Goma
Perno Inox 1/4 1.1/2" C/T 2u	2	CLP 2,380	Sodimac
Golilla Inox 1/4 2u	4	CLP 1,160	Sodimac
Perfil 40x40-2	1	CLP 17,550	Sodimac
Paños Húmeodos 42u	1	CLP 1,490	Sodimac
Tapa PVC 50mm	1	CLP 990	Sodimac
Tubo Inox 3" 1mt	1	CLP 26,990	Aravena Modified Parts
Abrazadera Alta Presión 3"	1	CLP 1,690	Aravena Modified Parts
Abrazadera Alta Presión 2.75"	1	CLP 1,690	Aravena Modified Parts
envío Aravena MP	1	CLP 3,990	Aravena Modified Parts
Pino 2x2 Bruto	3	CLP 5,103	Sodimac
Medidor Humedad Ut377a	1	CLP 24,360	AlphaHerramientas
Pino 2x2 Cepillado	8	CLP 21,520	Sodimac
Caja Wenco 61 lt	1	CLP 10,493	Easy
Amarracables XL	1	CLP 3,890	Easy
Llave Francesa 10"	1	CLP 12,690	Easy
Hilo 1mt 1/2 G NC	1	CLP 13,990	Easy
Perno 1/2 6" BSW Grado 2	2	CLP 3,980	Sodimac
Tuerca 1/2 BSW 2u	1	CLP 690	Sodimac
Terciado Abedul 4mm	1	CLP 23,788	Formas Wood
La Gotita 2ml	1	CLP 3,590	Sodimac
Pata Regulable	2	CLP 7,980	Sodimac
Tornillo 3x23 torx 500u	1	CLP 8,330	Rothoblaas

Costos

Desglose y Reflexión

El costo total de materiales e insumos para el desarrollo del proyecto fue de 502.008 pesos chilenos, que, si bien es relativamente alto en comparación con otros proyectos de título, responde al volumen de trabajo y fabricación de equipamiento necesario para llevar a cabo el proyecto. Se abordó el manejo de costos con la intención de mantener estos al mínimo posible sin comprometer la seguridad del equipamiento diseñado ni su desempeño.

Los costos mayores fueron la gata hidráulica, el perfil de fierro con que se construyó la plataforma de densificación y las mantas calefactoras de silicona, sumado la cantidad de madera necesaria para el desarrollo de los ensayos y manufactura de la silla. El equipamiento diseñado es capaz de seguir produciendo madera densificada por lo que el costo por espécimen se reduce en cada ciclo y resulta sumamente económico comparado con opciones de línea o manufactura tercerizada del instrumental.

Además, el carácter único de la silla D01 y posibles productos de madera densificada pueden ser comercializados como obra experimental y coleccionable, atrayendo un alto precio para cubrir los costos de investigación y desarrollo.

Proyecciones

Continuidad y Contacto

El proyecto tiene un alto potencial de continuidad en base las oportunidades inexploradas que se plantearon anteriormente, tanto en términos de la madera densificada para el diseño de productos, como la exploración de lógicas de fijación mecánica.

Es mi intención personal explorar avenidas de continuidad del proyecto ya que recoge elementos de trabajo material, experimentación formal, innovación y sostenibilidad que son tanto atractivos para mí como diseñador, como también relevantes para el desarrollo de la industria forestal, la investigación y el emprendimiento en Chile.

Existe un gran número de fondos públicos concursables a través de FONDECYT e iniciativas de organizaciones ligadas al sector forestal como concursos de innovación en madera impulsados por CORMA. Además, en el marco internacional el proyecto en su estado actual puede ser candidato al Material Driven Innovation Award organizado por MTRL y entrar en contacto con investigadores de madera densificada para discutir los hallazgos del proyecto, las avenidas de continuidad son múltiples.

Se ha iniciado contacto con el Centro UC de Innovación en Madera (CIM) y el Centro Nacional para la Industria de la Madera (CENAMAD) para explorar opciones de desarrollo del proyecto, ambas organizaciones han demostrado interés y se han coordinado reuniones inmediatamente después de la presentación del proyecto de título. Colaborar con organizaciones de este tipo es relevante para comunicar el proyecto y acelerar el desarrollo del mismo, aportando una mirada externa a la escuela de diseño y abriendo puertas para la continuidad de este, además de que independientemente de si la continuación del proyecto resulta exitosa o no, es valiosa experiencia de inserción al mundo laboral e innovación para comenzar el desarrollo de mi carrera profesional.



Conclusiones

Resultados y Aprendizaje

El desarrollo del proyecto de título fue desafiante y enriquecedor, desde un principio sabía que mis objetivos eran ambiciosos y lo mismo se me indicó durante la evaluación de seminario, aún así, nunca quise que el proyecto terminara en tan solo la presentación del material ya que una muestra final o productos de poco interés como posavasos dicen muy poco del material y no hacen justicia a su potencial o el esfuerzo de desarrollo que esconden.

Mi objetivo, incluso antes de concluir la investigación de seminario, siempre fue la fabricación de un objeto de alto valor agregado que sirviera como digno representante del estudio material y además desafiara mis habilidades de diseño plástico, ya que, desde mi perspectiva, tan solo la investigación material guarda muy poco del diseño que me apasiona.

Así se formuló el proyecto y se llevó a cabo el estudio material, desde el diseño y fabricación del instrumental necesario para crearlo, hasta un producto final terminado en este material, que pone sus capacidades al límite y manifiesta la rigurosidad con la que se llevó el proyecto.



Sin duda que, si bien me siento conforme con el proceso, sus aprendizajes y resultados, por la envergadura del desafío, resta un mar de aristas no abarcadas que deben ser consideradas para la continuidad del proyecto. Un estudio de modificación material de este tipo amerita mediciones de consumo energético, para realmente constatar si el proceso es sostenible o no, también hizo falta profundizar en posibles modelos de negocios o de difusión en torno al proyecto, de la mano con la aproximación a la protección de la propiedad intelectual del mismo, ya que el sistema de densificación es de diseño propio y ante sus buenos resultados corresponde considerar alternativas de protección o liberación de código abierto.

Disfruté del desarrollo del proyecto ya que no solo me permitió hacer lo que de antemano sabía que me gustaba, como diseñar objetos y construir cosas, sino que también me acercó a dimensiones disciplinares antes desconocidas para mí, las cuales he aprendido a apreciar y se han vuelto un nuevo interés, como el estudio mecánico de los materiales y el trabajo en el horizonte entre el diseño industrial, conocido por el manejo plástico de las cosas, y la ingeniería, encargada de conocer y desarrollar de manera informada y eficiente. Creo que en este horizonte se sitúa mi pasión por el diseño, y agradezco a este proyecto por permitirme descubrirlo.

Bibliografía

**todas las imágenes que no indican fuente corresponden a elaboración propia*

Álvarez González, V., Poblete Hernández, P., Soto Aguirre, D., Gysling Caselli, J., Kahler González, C., Pardo Velásquez, E., Bañados Munita, J., Baeza Rocha, D. (septiembre de 2022). Anuario forestal 2022. INFOR. <https://doi.org/10.52904/20.500.12220/32501>

Bedolla Pereda, D. (2002). Diseño Sensorial: Las Nuevas Pautas para la Innovación, Especialización y Personalización del Producto [tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña]. TDX. <http://hdl.handle.net/10803/6826>

Borrit, S. (2021, 2 de diciembre). Extraordinary Times for Lumber and Building Products. RBC Capital Markets. https://www.rbccm.com/en/insights/story.page?dcr=templatedata/article/insights/data/2021/11/extraordinary_times_for_lumber_and_building_products

Christian Borger. (s.f.). Research. <https://www.christian-borger.com/>

Eames Office. (s.f.). LCW. <https://www.eamesoffice.com/the-work/lcw/>

Ennos, R. (2021). The Wood Age. (1a ed.). Williams Collins.

EPFL+ECAL Lab. (s.f.). Under Pressure: Shaping extremely strong wood from easily grown species. <https://epfl-ecal-lab.ch/portfolio/under-pressure/>

FAO. (2022). The State of The World's Forests 2022. <https://www.fao.org/3/cb9360en/online/src/html/key-messages.html>

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2018). Global Forest Products Facts and Figures. <https://www.fao.org/3/ca7415en/ca7415en.pdf>

Gresham House. (2020). Global Timber Outlook. <https://greshamhouse.com/wp-content/uploads/2020/07/GHGTO2020FINAL.pdf>

ICAO. (s.f.). Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA). <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/default.aspx>

Neyses, B. (2019). Surface Densification of Solid Wood [tesis doctoral, Luleå University of Technology]. Digitala Vetenskapliga Arkivet. urn:nbn:se:ltu:diva-75794

Sandberg, D., Kutnar, A., Karlsson O. & Jones, D. (2021). Wood Modification Technologies. (1a ed.). CRC Press.

Song, J., Chen, C., Zhu, S., Zhu, M., Dai, J., Ray, U., Li, Y., Kuang, Y., Li, Y., Quispe, N., Yao, Y., Gong, A., Leiste, U. H., Bruck, H. A., Zhu, J. Y., Vellore, A., Li, H., Minus, M. L., Jia, Z., . . . Hu, L. (2018b). Processing bulk natural wood into a high-performance structural material. *Nature*, 554(7691), 224–228. <https://doi.org/10.1038/nature25476>

Sotayo, A., Bradley, D., Bather, M., Sareh, P., Oudjene, M., El-Houjeiri, I., Harte, A., Mehra, S., O’Ceallaigh, C., Haller, P., Namari, S., Makradi, A., Belouettar, S., Bouhala, L., Deneufbourg, F. & Guan, Z. (2020). Review of state of the art of dowel laminated timber members and densified wood materials as sustainable engineered wood products for construction and building applications. *Developments in The Built Environment*, 1. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2019.100004>

Stühlinger, J. (s.f.). The Rising Popularity of Wood. UBM Development AG. <https://www.ubm-development.com/magazin/en/the-rising-popularity-of-wood/>

Swiss Wood Solutions. (s.f.). Sonowood Sustainable wood for musical instruments. <https://sonowood.swisswoodsolutions.ch/en/>

UNECE. (2016, 21 de octubre). The 21st Century will be the century of wood. <https://unece.org/forestry/press/21st-century-will-be-century-wood>

Resolución de la Asamblea General 71/1, Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible A/RES/70/1 (25 de septiembre de 2015). <https://documents-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/N15/291/93/PDF/N1529193.pdf?OpenElement>

Salinas, F. (2020, 6 de octubre). La necesaria discusión sobre la evaluación ambiental de plantaciones forestales industriales. Heinrich Böll Stiftung. <https://cl.boell.org/es/2020/10/06/la-necesaria-discusion-sobre-la-evaluacion-ambiental-de-plantaciones-forestales>

Cabral, J. P., Kafle, B., Subhani, M., Reiner, J., & Ashraf, M. (2022). Densification of timber: A review on the process, material properties, and application. *Journal of Wood Science*, 68(1). <https://doi.org/10.1186/s10086-022-02028-3>



RESULTADOS ENSAYOS 01072023

DE : PATRICIO PÉREZ ROJAS
Jefe Laboratorio de Metalurgia y Materiales

A : Héctor Novoa Castillo
Profesor Diseño UC

REF : Ensayo de flexión en madera

FECHA : 05 de julio de 2023

Resultados

Ensayo de flexión en tres apoyos en seis trozos de madera de pino con distinto grado de compresión. Ensayo de dureza Brinell en tres de estos trozos.

TABLA 1: Resultados ensayo flexion

MUESTRA	MOE (MPa) M	OR (MPa)	HB (62,5/5,0)
Control	1134,7	83,85 5	,20
Control 50%	1263,5	124,0	
Reducción 50%	1063,9	111,8	
Reducción 20%	922,2	71,6	
Reducción 40%	967,7	88,4	
Reducción 60%	817,6	73,2	13,89
Reducción 65%		9	,26

DIMENSIONES PROBETAS			
Muestra	hA	ncho	Largo
	mm		
Control	40.5	40.2	600.0
Control 50% B	12.0	33.4	195.0
Reducción 20%	27.0	34.4	410.0
Reducción 40%	18.6	34.4	285.0
Reducción 50% A	12.5	34.4	195.0
Reducción 60%	8.83	3.2	300.0

Anexo

Transcripción Entrevista Vicente Stephens, DALCA

Vicente: [00:00:00] Ya estoy grabando. Bueno, un poco de contexto, estoy trabajando con madera densificada, que es como un proceso, de hecho me hice unas máquinas, una prensa hidráulica. Pero esencialmente lo que puedo hacer es llevar una sección de 2x2 normal de pino a esta sección más pequeña con pura compresión, y la densidad se multiplica por dos generalmente, dependiendo de la reducción de volumen que haga, y me queda una madera de un perfil mecánico mucho más elevado, como mejorada en el fondo, más dura, más densa también, y tiene un módulo de elasticidad mejor. Entonces, explorando qué se puede hacer con la madera, estoy queriendo hacer un prototipo de silla o algo por el estilo, más una serie de ensambles y uniones usando humedad, porque se hincha mucho con la humedad, como que trata de volver al volumen original. Y por eso, en el fondo el proyecto se enmarca [00:01:00] en la industria mobiliaria en Chile, una innovación en ese sentido. Por esto, me pareció apropiado contactarte.

DALCA: Cuéntame cómo te puedo ayudar

Vicente: Si brevemente me puedes contar tu experiencia como diseñador, y tu aproximación en el fondo, al diseño de muebles. Por qué quizás haces lo que haces o por qué este cariño por la silla también.

DALCA: Yo siempre de chico trabajé con la madera, y partí mucho en las embarcaciones. Me dedicaba mucho a hacer embarcaciones de madera y después por temas de oportunidades laborales e intereses, me fui [00:02:00] yendo mucho más por el mundo de la mueblería y por el mundo de lo que hacemos hoy en día que lo llamamos acá el taller como la carpintería digital. Encontré demasiado potente la forma en que trabajaban afuera, con todo lo que es el mecanizado CNC y toda la cuestión. Entonces ahí fui viendo una oportunidad de desarrollo de productos nuevos que aquí [en Chile] no habían, sobre todo en sillas, porque el mercado de la silla; para mí la silla es como uno de los objetos más más complejos de diseñar y fabricar. Entonces tenía mucho atractivo de desafío, es un objeto como muy único en sí mismo. Entonces, por eso fue un poco entre oportunidades que podíamos hacer algo nuevo, innovador, con un grado de dificultad interesante; por ahí empezó un poco la inquietudes. Además la madera, claro, es como un mundo así mismo porque es altamente compleja, como dices tú es un material vivo, se hincha [00:03:00] trata de volver a su origen. O sea, piensa que en Chiloé, las cuadernas de los veleros, que es como las costillas, la estructura por así decirlo, para que la cuaderna después no trate de trabajar en contra de la forma del casco, lo que hacen es que buscan ramas que tengan la forma de la cuaderna. Entonces, literalmente estos viejos van con un pedazo de MDF cortado con la forma de la cuaderna, yendo a buscar una rama al bosque que tenga esa misma forma. ¿Por qué? Porque la madera trata de tender de volver a su forma original. Si ya la cortaste así de forma anterior, no se va a mover tanto. Entonces, claro, hay que entenderlo de muchas formas, eso que estás haciendo tú es bien interesante en el sentido del mercado nacional. Porque qué es lo que pasa, tu cachai qué significa cada anillo de la [00:04:00] madera, ¿qué es?

Vicente: ¿En términos científicos? No mucho.

DALCA: Más que en términos científicos es como, mira, muéstrame el palo, el de pino, el grande. Si tú ves, fijate que el pino ese, el 2x2, tenía una línea blanca y una línea más oscura, ¿verdad? Y la línea blanca es más grande que la oscura ¿verdad? La línea blanca es el crecimiento en verano, la línea oscura es el crecimiento en invierno. Entonces, si te fijas, en verano crece, pero, una brutalidad. Ya si tú ves, por ejemplo, ahora déjame mostrarte algo un segundo. No sé si se ve un poco acá, pero te fijas, por ejemplo, en esta madera es parejo el crecimiento en invierno y en verano, ¿verdad? Y en algunos años crece más en invierno, [00:05:00] incluso, ¿eh? Yo tengo acá pino canadiense, o abeto que se le dice, y tiene una densidad muy similar a la del fresno, no como la del pino. Entonces pasa lo que tú tienes, o estás generando, que es como una madera más comprimida en sus secciones, eso se puede hacer desde el origen. A lo que voy yo, no es que este mal lo que tú estás haciendo, sino que es bueno compararlo, el ejemplo que estoy haciendo, porque eso si se hace desde el origen, desde la plantación del bosque, tú puedes generar esa densidad. Lo que pasa es que acá en Chile, comercialmente, los bosques los plantan muy rápido, o sea hacen que

crezcan muy rápido. Por lo tanto, el crecimiento, si te fijas es muy, muy grande; lo que genera una madera poco densa, lo que además genera una madera poco estable. Entonces, si el bosque es bien plantado, [00:06:00] con una densidad de árboles correcta, el crecimiento va ser más lento, pero va a tener una buena madera.

Entonces, ¿cuál es el argumento que te estoy diciendo? A lo mejor con el método que tú estás logrando hacer, te permite crecer árboles de forma más rápida, menos densa, pero después tú los puedes densificar de manera posterior. Entonces también puede ser algo interesante.

Vicente: Eso es en parte como el argumento que estoy desarrollando, de madera barata, de fácil ciclo, que las puedo mejorar, en post, por así decirlo.

Y en torno a esa experiencia material y elección del material en Chile, ¿cómo ha sido ese trabajo? ¿La madera nacional te sirve para muebles? ¿Has tenido que buscar madera afuera?

DALCA: No, no hay mucho nicho. O sea, a ver, no, no es nicho la palabra. No hay mucha densidad de productos [00:07:00] en Chile.

Desde las pulgadas madereras hasta otros tipos de formatos de aplicación, porque, el primer problema que pasa con la madera nacional en Chile, por todo lo que yo he conversado con vendedores de madera y gente del mundo de la madera, es que la madera se seca en Chile; hay hornos de secado en Chile, pero al parecer no hay un estudio certificado de cómo secar cada tipo de madera porque depende de la densidad, de la dureza, de la vejez de la madera, todo tiene una forma de secarlo en el horno.

Entonces, por lo que tengo entendido en Chile, lo que se hace es que se ve la densidad de la lenga con sus características, y se compara en cómo se seca, te invento, el cerezo en Estados Unidos, y la secan de esa forma; como que copian esa manera. Pero esa no es la manera más correcta.

O sea, si tú compras una madera nacional, te vas dar cuenta que tienes que despuntar un montón de material porque viene rajada y muy sobre seca hacia las puntas. En cambio, la madera importada no viene así. Viene con un secado correcto y [00:08:00] parejo en toda la madera. De hecho, la madera, por lo general, cuando la compras y la ves, tiene que tener 8% humedad en los exteriores y un 12% en el centro.

La madera nacional de repente puedes encontrar hasta un 30% en el centro y otro porcentaje es en la esquina. O de repente está sobre secada. En ese sentido, es un problema, y nosotros trabajamos con pura madera importada por lo mismo, o sea, si hubiera una política correcta de secado de la madera, sería espectacular. Me encantaría hacerlo, pero no es a lo que me dedico.

Pero ahí también hay la oportunidad, porque hay buena madera en Chile. Y el otro problema son los formatos que hay, los formatos comerciales. Hay muy poca variedad, si te fijas solamente puedes comprar de uno, en algunas maderas uno y medio; y en el resto dos pulgadas, pero hay de más pulgadas y de menos pulgadas, y hay materiales que yo tengo que importar directamente.

Por ejemplo, acá venden chapas de medio milímetro, el formato para las fábricas de puertas, pero para la mueblería, [00:09:00] las chapas de uno y medio, que lo que más se usa para hacer un laminado, no existen. Entonces, o sea, hay un par de proveedores, pero de manera muy poco buenas para el mueble. Entonces hay que importarla, hay muy poca variedad. Entonces, esas son dificultades que uno se encuentra en el camino. Hay que tratar de manejarlas.

Vicente: Y en esa búsqueda de madera importada, entiendo como que tienes que encontrar todo afuera ¿estás buscando una connotación plástica en el material? ¿cierta trabajabilidad? O algún tipo de performance, ¿cuál es en el fondo el criterio?

DALCA: Lo que pasa es que en la mueblería hay muchas maderas que se pueden usar, dependiendo los orígenes y todo pero, son muchas variables, uno es lo que quiere el cliente, precio, calidad, que en verdad funcione para la para la mueblería porque hay maderas que no son tan aptas para muebles, pero si son muy buenas para puertas, por ejemplo, el cedro. Nosotros hemos hecho muebles de cedro y todo, [00:10:00] pero hoy en día ya lo hemos discontinuado porque al ser una madera muy liviana, tiene una buena densidad, y una veta medio en pareja y un poro abierto, entonces funciona muy bien por ejemplo, para puertas y pisos, porque trabaja muy bien para la compresión, pero para las sillas o para cosas así es un poco más compleja, porque es muy ligera, entonces le falta estabilidad, por ejemplo, para las espigas para las cajas

En cambio, en la mueblería, por lo general, se usa mucho el roble americano, el fresno, nogal, haya, maple. Entonces, por lo general, hemos tratado de vender a esa misma madera que hemos tenido muy buenos resultados y también comercialmente funciona muy bien.

Vicente: Y en términos como el de emprender en el rubro del mueble en Chile, como en la lectura, como del mercado, ¿el cliente tuyo es usualmente personas, empresas? ¿que [00:11:00] tan sensibles son al precio?

DALCA: Nosotros partimos mucho de persona, pero siempre pensando, con visión comercial, las empresas, o sea, el público B2C te permite probar el producto, testarlo, corregirlo; porque tienes que hacerlo, es imposible que salga a la primera.

Y eso después te permite ya vender con calma a empresas, sobre todo en el mundo de la mueblería, si tú vendes empresas, van a ser de alto tráfico, porque van a comprar de 100, 200, 400 500 unidades. Entonces por esto, tienen que estar bien testeadas. Eso a nosotros nos ha posicionado en una forma donde nosotros creemos que somos únicos en el mercado, porque he trabajado mucho con la carpintería digital y creemos que somos lo únicos que hacemos las cosas como la hacemos.

Hay mucha mueblería de sillas y todo, pero también es complicado el volumen. Entonces, en ese sentido, la fabricación digital nos ha permitido [00:12:00] generar una cierta rapidez de trabajo y volumen que nos permite meternos en las empresas. Y eso es algo que como a nivel de negocios muy bueno.

Vicente: Y no sé si esto es algo que como que te acomode mencionar, pero ¿usualmente venden a oficinas, hoteles? ¿Cuál es como el perfil de su cliente, empresa?

DALCA: tenemos mucho, proyecto de hotel, restorán, cafetería principalmente también de repente hemos trabajado con algunas universidades.

Es un poco variado en sentido, pero claro, es un perfil muy generado al alto tráfico, principalmente.

Vicente: Y en términos de innovación, ¿te parece relevante en la industria del mueble, tener un aire de innovación siempre y más o menos como te aproximas a ello?

DALCA: Por supuesto, cada día [00:13:00] hay más exigencia en rapidez en calidad en un millón de cosas. Porque claro, antes a lo mejor podías demorarte más tiempo en hacer un mueble y podías lograr algo de mayor calidad. En cambio, si estás con mucha exigencia de cantidad, y hay mucha competencia y a parte compites con los chinos y la importación, es importante todo el rato estar innovando.

Nosotros estamos haciendo esta parte de innovación con la carpintería digital, pero creemos que igual esto no es lo único, o sea, el día mañana algo más tenemos que innovar y constantemente estamos buscando desarrollos. Tienes que estar constantemente desarrollando ideas nuevas, uniones nuevas, nuevas formas de ver la madera, es algo muy interesante.

Vicente: Y en ese sentido, la evolución en términos de innovación, ¿tú la ves como por la forma del [00:14:00] objeto, como de su valor plástico? O el tema como del proceso productivo, como el mecanizado.

DALCA: Depende, las dos porque yo creo que ningún trajo incorrecto. Nosotros trabajamos con galerías de arte que buscan el argumento en dar forma a objetos de madera que no se pensaba o no, no se entendían de cómo poder fabricarlo en madera, y eso es un desafío de algunas forma. O también puede ser la inversa, como tú, crear un nuevo proceso productivo que tiene un resultado, una forma y un diseño. Al final, ambas son igual de desafiantes y son igual de posibles de fabricar. En ese sentido, creo que hay libertad dependiendo de cómo uno argumente la propuesta.

Vicente: Y volviendo quizás al tema material, entiendo que tienes que importar casi toda la madera con la que producen en DALCA y en tus otros proyectos. ¿Esto es algo que tú te esperabas? [00:15:00] ¿Fue algo que tuviste que aprender, que así funciona y que la madera acá no te da?

DALCA: Sí, mucha prueba y error, mucha prueba y error. Obviamente que partí siempre con madera nacional, era lo que más quería, trabajé con mucho castaño, mucha lenga, raulí.

Pero, también muchas personas me pedían, el cliente pedía: “es que quiero que se vea como esta madera”. Entonces es difícil encontrarla y al final buscando, temas de la calidad del mueble como salía, tema de posventa, tema de secado de la madera, al final, como que el mercado me fue llevando a eso principalmente. Hoy día ya algo que es parte del modelo de negocios y tiene que ser madera así, a menos de que cambie, sería interesante, pero por ahora, yo no tengo cómo ofrecer esa opción.

Porque, por ejemplo, si a mí me piden hacer un proyecto para una empresa con una manera más económica, yo nunca voy a ofrecer [00:16:00] pino. Porque el pino, hoy en día, localmente, es una madera que el día de mañana me va a traer problemas y no va a durar en el tiempo el mueble. No va a lograr ese nivel. Entonces, por esto estamos trabajando con este pino/abeto canadiense, que es muy similar en precio y tiene otra calidad, por eso la he usado.

Vicente: En términos de esa competencia en precio, ¿importar es mucho más caro que comprar acá?, ¿o es lo mismo?

DALCA: Prácticamente lo mismo. Hay maderas importadas que son más caras porque la madera es más cara.

Pero hoy en día del precio de la madera actual, es prácticamente lo mismo que alguna madera importada. Incluso algunas maderas nacionales son más caras que una madera importada, que eso no lo puedo entender.

Vicente: Entonces, la madera chilena, ¿dirías que tiene como un tema con las secciones que te venden, el tamaño y como el cuidado en el fondo, la calidad productiva del producto? [00:17:00]

DALCA: O sea, sí, al final, mira, lo que pasa es que nosotros tenemos toda una forma de ver el modelo negocio que sea mueble a largo plazo. No hacemos mueble retail que se cambien por temporada. Entonces la calidad del producto y la materia prima tiene que ser impecable.

Entonces, como en todas las cosas, pueden tener errores, pero tienes que tratar de minimizarlo, y si la materia prima, algo que tengo que tratar de controlar desde el origen, voy a buscarlo mejor. Por eso, al final, si la madera nacional no está cumpliendo, a lo mejor te puedes adecuar a los formatos, te puedes adecuar en tus propuestas.

Ya eso es algo que puede ser más posterior, pero la calidad no la tienes como adecuar. Tu no puedes decir que vas a ser de muebles de mala calidad, o sea, a lo mejor lo puedes anunciar, pero no es nuestro objetivo. Si no la materia misma no [00:18:00] cumple el final de repente, el estándar que queremos nosotros en la longevidad del tiempo y en la vejez del mueble, no lo podemos comprar. No lo podemos tratar en sentido. O sea, sería interesante que se haga, me encantaría hacerlo. Sería interesante poder tener o hacer un estudio de políticas de secado de la madera, tener más opciones, sería espectacular, pero no, no tengo tiempo ni en este minuto para a hacerlo.

Vicente: Y cuando tú me dices que a veces el cliente te dice qué madera quiere o el look que se está esperando. ¿Cuál es tu lectura en torno de eso? ¿Están buscando un color, acabado...?

DALCA: Lo que pasa es que en Chile todavía no se sabe mucho la madera, siempre piden con el color y que no tenga nudos. Pero en cuando trabajas para afuera o con otros mercados te piden poro abierto, poro cerrado, beta radial, beta tangencial, etc. Hay muchas más formas de ver la madera. [00:19:00] Entonces, claro. Aquí por original, te dicen veta y color, pero está la opción nacional. Por ejemplo, el roble americano, que es una de las maderas que más te piden por veta y color, es muy similar al castaño. Y castaño nacional, hay. El problema, es que el castaño nacional hoy en día es invendible. Anteriormente, antes de la pandemia, había mejor [castaño], y se podían encontrar buenos pedazos de castaño. Hoy en día es imposible, no lo puedo vender, parece un pedazo de palo sacado del puerto. Me refiero al puerto como si fuera un muelle, hecho pedazos. Entonces ¿la verdad? No, no puedo vender esa madera. Y me encantaría poder [00:20:00] hacerlo. Pero no, no se puede.

Por eso digo, al final, claro, hay opciones en veta y en color, pero si la calidad no la cumple, no la puedo tomar.

Vicente: Y por último, temas de la propuesta y la sensibilidad al precio, tú tuviste que decir “quiero llegar a este precio y esto es más o menos lo que tiene que costar, porque esto es lo que sé que van a comprar”, o fue prueba y error.

DALCA: No es que eso es prueba y error constantemente, porque también un producto muy barato en la mueblería van a pensar que es algo de mala calidad. Un producto muy caro en la mueblería también es muy difícil de vender, y también tiene que estar perfecto. Hay más variables, no sólo el material: tu rapidez, tu mano de obra, tu maquinaria, lo complejo que es hacer ese diseño.

Entonces, todo eso entra en una variante en donde tienes que tratar de llegar a un punto de equilibrio. Hay precios que son muy bien aceptados por el [00:21:00] mercado, pero también depende en dónde tú te quieres posicionar, porque a lo mejor tú quieres vender una silla al año, que cueste 2M la silla, o quieres vender masivo, como si fuera un super8 y vendes a 60.000 la silla, pero tienes otro perfil, otro mercado. Entonces, ahí es mucho el objetivo que tú quieras darle. Obviamente que uno se tiene que fijar en la competencia. Hay precios que uno trata de llegar y precios que no se pueden .

Vicente: Bien. Bueno, eso en el fondo serían mis preguntas. Muchas gracias por tu ayuda.

DALCA: No, ningún problema Vicente. Igual anda contándome cómo te va, para ir viendo los resultados, está interesante el proyecto.

Vicente: Sí, lo tengo que cerrar en tres semanas, asique, prontamente te voy a enviar los resultados. Muchas gracias.

DALCA: Vale Vicente, que estés bien. Toda la suerte. [00:22:00]

dense

