

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE TÍTULO 2019
FACULTAD DE ARQUITECTURA Y URBANISMO DE LA UNIVERSIDAD DE CHILE

VITRO-CERÁMICOS DE RELAVE POR IMPRESIÓN SOLAR

APROXIMACIONES SUSTENTABLES DE MANUFACTURA ADITIVA EN AMBIENTE EXTREMO CHILENO



PELIGRO
NO INGRESAR
SECTOR DE RELAVES
INACTIVOS

AUTOR

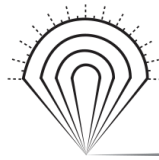
LUIS MOSQUERA VALDEZ

PROFESOR GUÍA

ALBERTO FERNÁNDEZ GONZÁLEZ



Tesis de Investigación para optar al Título de Arquitecto
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Universidad de Chile
2019



VITRO-CERÁMICOS DE RELAVE POR IMPRESIÓN SOLAR
APROXIMACIONES SUSTENTABLES DE MANUFACTURA ADITIVA EN AMBIENTE EXTREMO CHILENO

AUTOR
Luis Mosquera Valdez

PROFESOR GUÍA
Alberto Fernández González

*A todas las personas que creyeron en mí,
en especial a mis padres Adalguiza y Luis.*

AGRADECIMIENTOS

A mi profesor guía, Alberto Fernández,
quien ha supervisado mi proceso investigativo por dos años,
otorgándome un renovado interés por los aspectos digitales del diseño.

A los profesores FAU,
Pedro Soza y Bárbara Rodríguez de Arquitectura,
Fernando Pino de Geografía y Andrea Wechsler de Diseño,
por su contribución en momentos esenciales de este proyecto.

A los profesores de la Universidad del Bío Bío,
Cynthia Droguett y Mario Núñez,
por su apoyo en el desarrollo de los ensayos materiales.

A los Ing. Matías Mattamala e Ignacio Moya, de Beauchef Proyecta,
así como a Brian Townley de Geología y Gonzalo Montes-Atenas de Ing. en Minas,
con quienes compartí la compleja travesía del trabajo transdisciplinar.

A mis amigos y compañeros, Sebastián, Diego, Magaly, Eduardo,
quienes hicieron de mi estadía en la facultad una experiencia más agradable.

A Braulio y Marcelo, simplemente por estar ahí.

RESUMEN

El presente estudio persigue el desarrollo de un material vítreo-cerámico que sirva como aproximación sustentable a nuevas maneras de construir, las mismas que pueden emerger de las condiciones físicas abundantes y complejas de los ambientes extremos, donde la aplicación de sistemas de construcción tradicionales se ve dificultada por altos costos asociados a su condición vasta, lejana y de difícil acceso.

El advenimiento del diseño digital en la arquitectura hizo posible atender la idea de una materialidad parcialmente formada por una cultura tecnológica capaz de personalizar en masa, contrapuesto a la estandarización en masa monopolizada por la gran industria. Sin embargo, a pesar de la exitosa incursión de sistemas de manufactura aditiva en la escala menor del diseño de objetos, persiste una crisis en su traspaso a la dimensión de la construcción humana, frenado por costos en energía y materiales no escalables.

El sistema incipiente “Solar sinter” de impresión solar de áridos logra aplicar lógicas circulares a la producción de sólidos vítreos, combinando tecnologías complejas, *high-tech*, con el sentido sustentable de la cultura material tradicional, *low-tech*. En Chile este discurso cobra más sentido debido a la posibilidad de cruzar este sistema emergente de materialización en base a energía renovable, con el reciclaje del desecho de la gran minería, el relave.

De este modo, esta investigación esboza una caracterización física, constructiva y ambiental de este material incipiente a través del ensayo de sus propiedades físicas y mecánicas básicas, de la tabla comparativa de su aplicación especulativa frente a soluciones constructivas genéricas y del enfoque de análisis del impacto ambiental respecto a la producción artesanal del ladrillo.

Palabras clave:

Nuevos materiales / construcción in-situ / manufacturas aditivas /
impresión solar / relave minero

ÍNDICE

CAPÍTULO PRIMERO: PRESENTACIÓN DEL TEMA

1.1	Introducción	1
1.2	Motivaciones.....	2
1.2.1	Indagaciones previas.....	2
1.3	Problema de investigación	4
1.4	Pregunta de investigación	8
1.4.1	Hipótesis	8
1.4.2	Objetivos	8
1.5	Limitaciones	9

CAPÍTULO SEGUNDO: MARCO TEÓRICO

2.1	Sostenibilidad del entorno construido	11
2.1.1	Ecología industrial.....	12
1.	Materiales de bajo impacto ambiental	13
2.1.2	Recursos circulares de ambientes extremos globales y chilenos.....	14
1.	Energías renovables	20
2.	Material reciclado y de gran disponibilidad.....	21
2.1.3	Construcción sustentable low y high-tech	22
2.2	Materiales constructivos desde desecho minero.....	24
2.2.1	Industria de la gran minería chilena.....	25
1.	Impacto ambiental de la minería	27
2.	Propiedades geoquímicas del relave.....	29
2.2.2	Cerámicos de relave	30
1.	Proceso térmico	31
2.3	Manufacturas aditivas cerámicas	32
2.3.1	Impresión 3D en la escala constructiva.....	34
1.	Extrusión vs. cama de polvo	35
2.3.2	“Solar sinter” de Markus Kayser	36
1.	Sistema óptico-térmico.....	40
2.	Sistema meca-trónico	42
2.4	Conclusiones de la revisión de literatura	44

ÍNDICE

CAPÍTULO TERCERO: METODOLOGÍA

3.1	Diseño experimental	47
3.1.2	Técnicas.....	48
1.	Ensayo material por norma chilena	49
2.	Tabla comparativa de aplicaciones constructivas	50
3.	Enfoque de Ciclo de Vida por norma ISO	51

CAPÍTULO CUARTO: DESARROLLO

4.1	Tratamiento de impresión solar	53
4.1.1	Parámetros.....	62
4.1.2	Probetas.....	63
1.	En laboratorio	64
2.	En terreno	72
4.1.3	Ensayos	76
1.	Absorción de agua	76
2.	Resistencia a la compresión	78
4.2	Aplicaciones constructivas especulativas	80
4.3	Enfoque de Ciclo de Vida.....	82
4.4	Análisis y discusión de resultados	86

CAPÍTULO QUINTO: CONCLUSIONES

5.1	Sobre las preguntas de investigación	89
5.2	Alcances futuros.....	92

Bibliografía	94
--------------------	----

Glosario solar	100
----------------------	-----

Anexo A - Documentos mecanizado.....	104
--------------------------------------	-----

Anexo B - Soluciones constructivas genéricas DITEC.....	112
---	-----



1.1 Introducción

La presente investigación aborda el desarrollo de un material vitro-cerámico fabricado in-situ mediante concentración de energía solar sobre desecho minero en el desierto de Atacama, el cual es descrito en sus propiedades físicas, constructivas y ambientales básicas. La producción sustentable de material constructivo, haciendo uso de manufacturas digitales en cuanto permiten una personalización en masa de estos objetos, busca revitalizar nuestro vínculo con la dimensión física del entorno construido. Estas operaciones podrían, en un futuro no muy distante, revelar modos alternativos y económicos de construcción, en respuesta a la saturación del entorno por un modelo de industria constructiva en crisis.

La accesibilidad técnica a la energía y al material del ambiente extremo emerge como hilo conductor entre elementos de convicción cruciales: la impresión solar por “sinterización” de M. Kayser y el desecho de la gran minería chilena. Los mismos permiten la conformación volumétrica de un material sólido para realizar la observación de su comportamiento y la relación de su proceso con el de elementos constructivos más tradicionales, pero menos sustentables, de manera que permita la especulación de su alcance en sistemas constructivos futuros.

El estudio tiene una perspectiva que apunta a la creación de conocimiento que incluye “la promoción de tecnologías que ayuden a mejorar o hacer nuevos productos” (Merriam-Webster, 2019), y por ende se adscribe a la Investigación y Desarrollo (I+D). Esta actividad juega un rol positivo en el crecimiento económico de los países OCDE, Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico, llegando a gozar de un financiamiento promedio del 2.3% de su producto interno bruto. Su práctica presenta todavía un desafío para Chile, ya que nuestro país sólo invierte un 0.36% de su PIB, siendo el miembro que menos recursos destina para este fin (OECD Data, 2017).

En este capítulo se establece el problema, siendo preámbulo del documento, que se compone de una parte teórica, donde se levantan los antecedentes y conceptos relevantes de la literatura que circundan la temática de la manufactura aditiva sustentable por impresión solar sobre desecho minero en el ambiente extremo desértico del norte de Chile, incluyendo, también, los lineamientos metodológicos que sustentan la implementación técnica de pruebas experimentales; y una parte práctica donde se lleva a cabo la evaluación física del material, sus posibles aplicaciones en la escala habitable y la comparación de su proceso desde el enfoque de Ciclo de Vida de un producto constructivo.

1.2 Motivaciones

El interés personal de este estudio emerge de la variedad de intersecciones disciplinares que pueden asociarse a la arquitectura, y por ello, pretende abordar un debate más ecuménico en torno a la materialización de nuestro hábitat. La ingeniería de materiales y las tecnologías de fabricación digital pueden convocarnos frente a otras profesiones en un espacio común de trabajo multidisciplinar donde la búsqueda de innovación sea el mecanismo de intercambio de conocimiento.

Por lo mismo, el alcance de este trabajo hubiera sido notablemente más acotado sin el generoso aporte académico, e incluso económico, de profesionales de la ingeniería mecánica, eléctrica, minera y geológica, así como del diseño industrial y la geografía.

1.2.1 Indagaciones previas

Es necesario mencionar la línea de conocimientos específicos, desarrollada a lo largo de la carrera, que nutre este trabajo: diseño digital, viaje al lugar extremo y experimentación material, dan forma a respectivos procesos académicos que son revisadas brevemente a continuación.

Fig. 1-3. Etapas previas de formación para la investigación. Elaboración propia.

Práctica profesional

El diseño paramétrico, fabricación digital, BIM y realidad virtual, sirvieron como recursos tecnológicos para plantear estrategias que atiendan, de manera sistémica, una diversidad de estímulos de orden geométrico, espacial y arquitectónico.

La definición profesional de algoritmos paramétricos ayudó a profundizar sobre el uso del computador como una herramienta compleja para la producción arquitectónica.

Las motivaciones comerciales ligadas a la identidad estética llevaron a cuestionar la intersección del diseño digital con aspectos más sensibles y significativos del habitar.



Workshop EEI MIT+PUC

El taller, de equipos de arquitectos e ingenieros, tuvo la misión de levantar restricciones naturales del desierto de Atacama para diseñar sistemas mecánicos que sirvieran de base a nuevos métodos constructivos.

El ambiente extremo desértico se estudió como un sistema sinérgico donde se puede hacer “más con menos” en atención a lo que comunican sus energías.

Expertos del diseño digital expusieron nuevas tecnologías de materialización, como la organización autónoma, *Self-assembly*, o la sinterización con luz solar, *Solar sinter*.



Seminario de investigación

La posibilidad de combinar energías y materiales en contextos controlados de diversas escalas, permitió establecer un equilibrio estructural incipiente de piezas auto-ensamblables con cierto grado de autonomía.

La configuración de la unidad básica permitió una moderada exploración material mediante la sinterización solar de arena por lente de Fresnel.

Los resultados sugerentes motivaron llevar las tecnologías observadas a una nueva escala investigativa, buscando optimizar el proceso aplicado en material desechado.



1.3 Problema de investigación

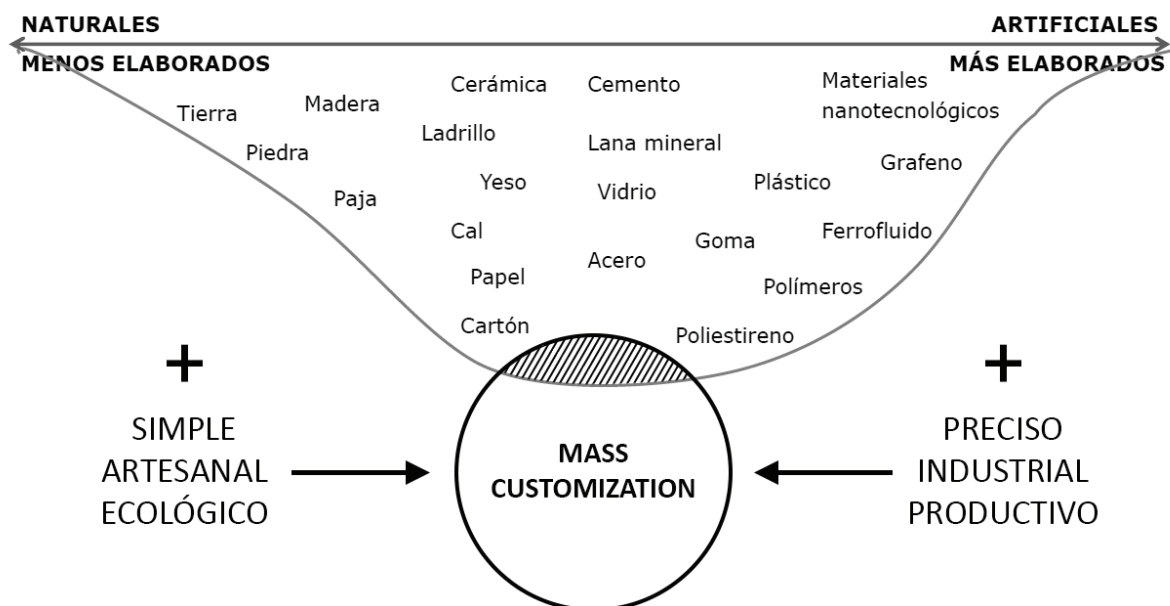
El enfoque de este estudio radica en la materialización de nuestro entorno artificial. Desde la arquitectura se proyectan espacios que demandan objetos materiales para delimitar la naturaleza inmaterial del habitar humano. Por esto, debe enfrentar una dimensión física que está “parcialmente formada por la cultura, particularmente por la tecnológica” (Picon, 2004).

La cultura tecnológica que sustenta la materialidad aplicada en la construcción actual, si bien reconoce las técnicas tradicionales del pasado, está fuertemente influenciada por la capacidad de producción estandarizada y masificada de objetos devenida de la revolución industrial.

Una categorización básica de los objetos usados para la construcción humana puede distribuir dicho universo material según su grado de elaboración. Así, de un lado del espectro encontraremos productos elaborados de forma artesanal, generalmente sencillos de fabricar y cuya materia prima puede hallarse de manera natural. En el lado contrario, los objetos se conforman mediante complejos procesos que son precisos, rápidos, y alcanzan un mayor volumen de producción.

Como se observa en la Fig. 4, ambos modos contraponen características atractivas para la producción: lo menos elaborado resulta accesible y “personalizable”, pero en menor escala; lo más elaborado resulta estandarizable a gran escala, “en masa”.

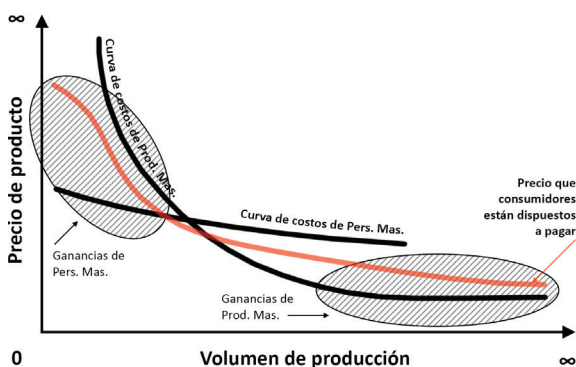
Fig. 4. Relación entre “masivo” y “personalizable” en el grado de elaboración de materiales constructivos. Elaboración propia.



Los conceptos que emergen al comparar el grado de elaboración de materiales para la construcción no son realmente antagónicos. Es la dimensión económica del proceso de producción de ambos lados del espectro la que implica su enfrentamiento en base a la lógica mercantil de la oferta y la demanda. Sencillamente, la producción “en masa” permite que un mayor volumen retorne los costos del capital de inversión. En cambio, aunque satisfacer las necesidades personales de los consumidores se traduce en valor agregado, el volumen de producción descende, pudiendo no justificar la inversión, lo cual se grafica en Fig. 5.

En las últimas décadas, técnicas modernas de fabricación, unidas a tecnologías de la información y la comunicación (ICT), han llevado a algunas empresas de producción baja a media, a obtener ventajas sobre sus competidores implementando la “personalización en masa” (Jiao et al., 2003).

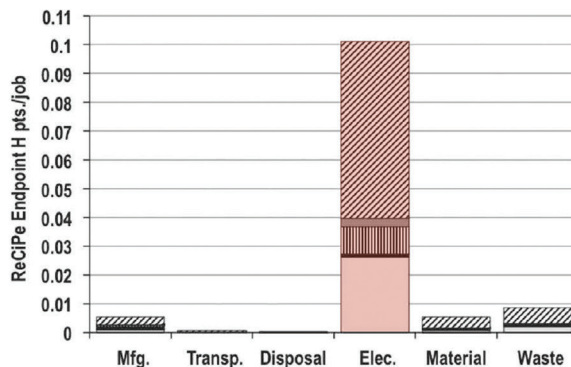
Fig. 5. Implicancia económica de “personalización en masa”.
Fuente: Jiao et al.



Se denomina personalización en masa a la fabricación automatizada de productos a medida. Una gran cantidad de tecnologías emergentes apuntan a este objetivo, y aunque se apoyan en avances ICT, enfrentan un gran desafío para volverse plataformas de producción confiable para un consumidor final (Kull, 2015). Un ejemplo notable de tecnologías de personalización en masa es la manufactura aditiva de la impresión 3D.

Esta variedad de procesos de manufactura asistida por computadora ha logrado transportar exitosamente la capacidad de “autoría” hacia la producción doméstica de objetos (Carpo, 2012). Este desempeño loable ha suscitado el desarrollo de procesos mecanizados de impresión en la escala habitable humana, mismos que han sufrido el incremento de problemas soslayables en la escala doméstica, como el costo del material y el impacto ambiental del uso de energía eléctrica (Faludi et al., 2015).

Fig. 6. Impacto ecológico de impresión FDM con ABS.
Fuente: Faludi et al.

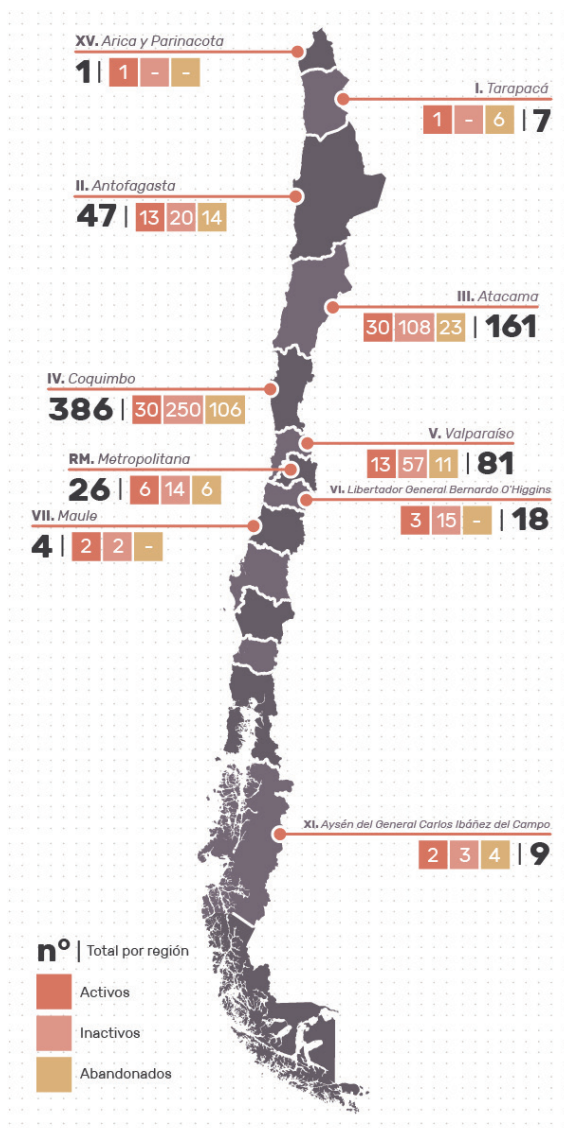


Los procesos de fabricación de formas no estandarizadas han presentado dicha “crisis de escala” al menos por dos décadas (Carpo, 2012). Puede sumarse el cuestionamiento sobre la sostenibilidad de las tecnologías digitales, si bien estos prejuicios han disminuido por su capacidad adaptable y descentralizada (Carpo, 2007). Consciente de ello, la investigación en torno a estas tecnologías se ha orientado hacia un desempeño más sustentable, sobre todo respecto a la demanda energética, la cual puede llegar a reducirse hasta un 74% usando luz solar (Kreiger & Pearce, 2013). En este punto, tal vez ningún estudio ha sido tan significativo como el “Solar sinter”.

En 2010, el diseñador industrial Markus Kayser logró imprimir piezas de material vítreo con una cama de arena que se movía bajo el punto focal de un sistema óptico de seguimiento solar. Llamado “sinterizador solar” por su parentesco a la técnica de Selective Laser Sintering (SLS), permitió mostrar el potencial de la fabricación digital en ambientes donde “energía y material se encontraran en abundancia” (Etherington, 2011). De esta forma, el sistema se volvía especialmente válido para una construcción en ambientes extremos, donde el uso de técnicas tradicionales se vea desfavorecido, como en desiertos, islas, estepas, selvas y los polos, o incluso extraplanetarios, como un asentamiento marciano (Kayser, 2013).

Sin embargo, la propuesta de Kayser ignoró un análisis físico del material, a todas luces frágil, principiando un vacío de información que se extiende en la literatura afín (Morris et al., 2017). A su vez, la elección de la arena como materia prima podría objetarse en cuanto es un árido natural sobreexplotado por la industria constructiva (Owen, 2017).

Fig. 7. Mapa regional de relaves en Chile. Fuente: relaves.org.



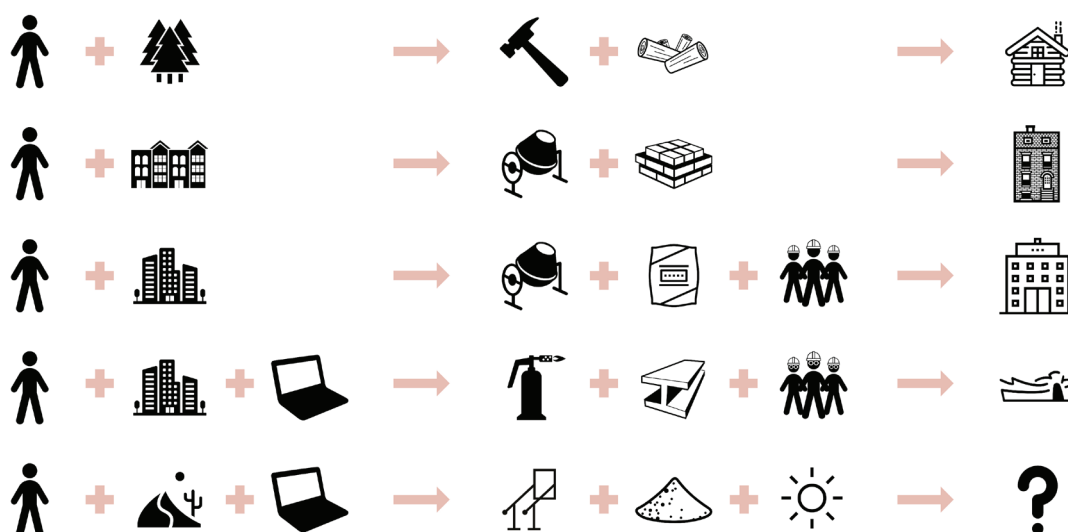
Estas discrepancias, lejos de desacreditar el trabajo de Kayser, motivan a retomar su línea investigativa, sobre todo aquellas referidas a la materia prima del sistema, ya que el contexto nacional ofrece un inventario de material árido en abundancia, el desecho minero conocido como relave.

La minería nacional produce cerca de un millón y medio de toneladas diarias, o un cerro Santa Lucía cada 36 horas, de roca molida (Esturillo, 2019), compuesto por aluminosilicatos en granulometrías con semejanza a la arena (Sernageomin, 2020), y cuya ubicación, en Fig. 7, coincide con la zonas de mayor potencial del recurso solar, con hasta $9 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ diarios o $3000 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ anuales, que equivale a la energía liberada por medio metro cúbico de carbón ardiendo por todo un año (Alonso, 2012).

La valoración del desecho minero en la construcción se enfoca en procesos industriales lejanos a la personalización en masa, como técnicas de sinterización cerámica (Jian et al., 2011; Ranfang et al., 2012; Deng, 2012; Karhu et al., 2018). El concentrador por Fresnel, más accesible, puede alcanzar temperaturas de fusión, formando un material mixto no estudiado.

Condiciones favorables para su estudio, como concursos CORFO (AMTC, 2016), así como perspectivas de democratización de material constructivo en escenarios extremos, vuelven al reciclaje de este desecho una oportunidad de exploración material sobre modos alternativos de construcción, los que demanda su ensayo material, su contrastación con técnicas constructivas y una perspectiva de su impacto al ambiente.

Fig. 8. Conceptualización de componentes de sistemas tecnológicos de construcción tradicional y en ambiente extremo. Elaboración propia.



1.4 Preguntas de investigación

¿Cómo se atiende el problema del relave en Chile desde la materialidad constructiva? ¿De qué manera es posible producir un material sólido y modular, comparable al ladrillo cerámico, usando la manufactura aditiva “Solar sinter”?

¿Qué aplicaciones constructivas son posibles de prever tanto para la impresión solar de relave minero como para el sistema de concentración solar mecanizado?

¿Presenta ventajas comparativas respecto a su impacto ambiental frente a técnicas tradicionales como la producción de ladrillo cerámico artesanal?

1.4.1 Hipótesis

El presente proceso de impresión solar, basado en el sistema de manufactura aditiva “Solar sinter”, permite la constitución accesible pero incipiente de formas vitro-cerámicas, así como el ensayo de sus propiedades físicas básicas.

El material resultante se hace posible desde un proceso de manufactura sustentable, cuyas etapas de producto y fin de vida presentan un enfoque de bajo impacto ambiental en comparación a la producción de ladrillo cerámico artesanal.

1.4.2 Objetivos

General

Desarrollar un material sustentable, con propiedades constructivas básicas, mediante la intersección de la fabricación digital y la accesibilidad de recursos materiales y energéticos del ambiente extremo desértico chileno. Esto conlleva, de manera particular, a la impresión de material vitro-cerámico desde desecho minero mediante proceso simplificado de manufactura aditiva “Solar sinter”.

Específicos

- Recopilar antecedentes teóricos que engloban el proceso: sustentabilidad para el entorno construido, material constructivo desde relave minero y manufacturas aditivas cerámicas.
- Dimensionar las propiedades físicas básicas del material resultante de la fusión solar de desecho minero.
- Establecer relaciones especulativas respecto a su posible aplicación frente a soluciones constructivas genéricas.
- Esquematizar, en términos de impacto ambiental, el Ciclo de Vida del producto, respecto el proceso del ladrillo artesanal.

1.5 Limitaciones

Ciertas condiciones referentes al desarrollo de este estudio no son plausibles de cumplir, respecto al tipo de ensayos de materiales a realizar, por lo que el tamaño y el número de muestras deberá acotarse a un mínimo razonable. Se declara la dificultad del establecimiento de relaciones y generalizaciones cuantitativas, ya que experimentos de esta índole suelen demandar un tamaño de muestra mayor para asegurar una distribución representativa.

Lo anterior se debe, exclusivamente, a la naturaleza incipiente del sistema de producción material estudiado. El mismo posee una literatura específica más bien escasa que indica, en concordancia con Morris et al., que debe ser optimizado. Los requisitos de diseño y cálculo de material cerámico, obtenidos de acuerdo a normativa chilena, son adecuados a las escalas factibles de producción, lo cual se detalla en el apartado metodológico.

Por limitaciones de salud, un levantamiento extensivo del material de desecho minero no será posible, por lo que se priorizará una sola ubicación, cuya elección estará sujeta a la disponibilidad de recursos.



Fig. 9. Primer mecanismo de impresión solar implementado. Elaboración propia.



2.1 Sostenibilidad del entorno construido

La explotación industrial de los sistemas naturales afecta en gran medida la viabilidad de la renovación sostenible de sus recursos, pudiendo llegar a agotarlos para las generaciones actuales y futuras. Si bien se han desarrollado instrumentos para la sostenibilidad en la producción material para la construcción, como los ISO o One Brighton, los efectos de aplicarlos han sido menores (Wechsler, 2013). Actualmente, los procesos de crecimiento urbano demandan una cantidad sin precedentes de productos para la construcción, algunos de los cuales continúan siendo ajenos a los principios de la sostenibilidad, lo que vuelve más pertinente la necesidad de buscar alternativas a prácticas constructivas que no sean sostenibles.

Los entornos extremos presentan una cantidad abundante de recursos materiales y energéticos que pueden servir como entradas para nuevas líneas de fabricación. Basándose en la integración de dicha abundancia de recursos con la minimización de desechos y la maximización del uso de entradas, es posible aplicar la “circularidad”, o el modelo económico donde la salida de residuos fomenta circuitos recursivos de energía y materiales, en contraste con la economía lineal de los mercados modernos.

Los principios de circularidad son necesarios para llevar una noción de producción constructiva desde el concepto de una “economía abierta”, que posee infinitos recursos de entrada y de sumideros de producción, al de una “economía cerrada”, en la que los recursos y sumideros quedan vinculados y pueden permanecer el mayor tiempo posible integrando el sistema (Boulding, 1966).

Desarrollada a partir del estudio de sistemas fundamentados en la retroalimentación, como algunos sistemas biológicos, su propagación y aplicaciones prácticas evolucionaron mediante diferentes contribuciones de una variedad de conceptos que comparten la idea de bucles cerrados. Así, ha aportado a modelos como la “economía de bucle”, “de la cuna a la cuna”, el diseño regenerativo, la ecología industrial, la biomímesis y la economía azul.

Justamente, estos enfoques alternativos para la producción material han permeado en organizaciones de la sociedad civil, como el Programa Ambiental de las Naciones Unidas, que ha creado un marco de política general que fomenta el uso de mecanismos como la ecología industrial. En ese sentido, esta investigación busca contribuir, de forma práctica, al desarrollo de un material con perspectivas constructivas bajo las lógicas de la economía circular.

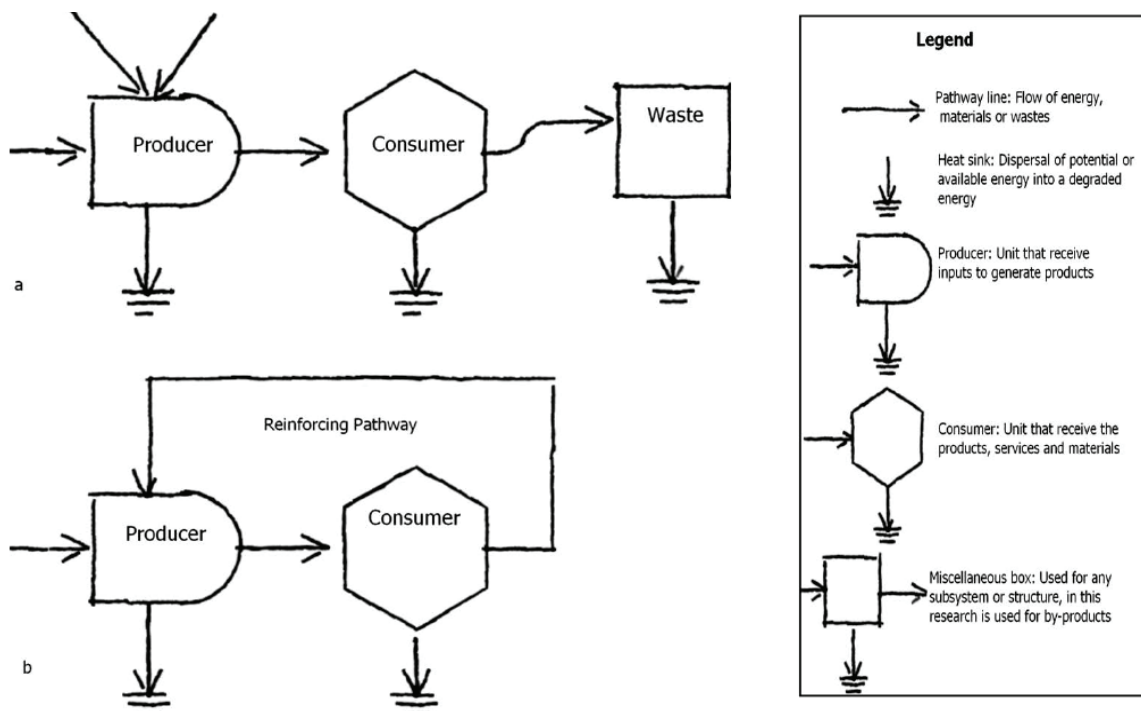
2.1.1 Ecología industrial

La ecología industrial, desarrollada en la década de 1970 en varios puntos del planeta, ha sido definida como “la ciencia del desarrollo sostenible” (Graedel y Allenby, 1995; Wechsler, 2013). Este campo de investigación, que convoca a múltiples disciplinas como la ingeniería, economía, sociología, toxicología y ciencias naturales, se utiliza en el presente estudio como base para el uso de subproductos resultantes de la producción de industrias contaminantes. Por ello, y en su condición de ambientes extremos, se considera la reutilización de sus desechos para un nuevo sistema de producción material.

La ecología industrial se enfoca en el parentesco de la actividad productiva con los ecosistemas naturales, en la manera en que se usa la materia y la energía, y la compara con los hábitos biológicamente insostenibles de los sistemas industriales tradicionales, analogía que se denomina metabolismo industrial.

De esta manera, el principal objetivo de esta estrategia es cerrar ciclos de materiales, buscando aproximarse a un nivel de residuos nulo. Esto se logra tomando los recursos desechados de una industria y volviéndolos a integrar como materia prima a otra, tal y como ocurre en los sistemas metabólicos naturales (Cervantes, 2009).

Fig. 10. Diseño de sistema no-superviviente, “abierto”, frente a diseño de sistema superviviente, “cerrado”. Fuente: A Weschler, H. Odum.

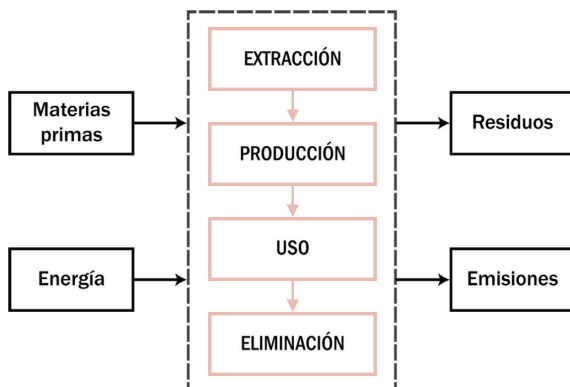


1. Materiales de bajo impacto ambiental

Para que un material pueda considerarse sustentable es necesario que siga los lineamientos enfocados en sostenibilidad que emergen de estrategias circulares como la ecología industrial, los cuales deben considerarse en todas las etapas del Ciclo de Vida del proceso productivo, como se detalla en Fig. 11.

Los materiales de bajo impacto ambiental atienden los componentes del Ciclo de Vida buscando que el producto provenga de fuentes renovables, materiales reutilizados, no tóxicos, biocompatibles y de gran vida útil, atributos que sirven como criterios de elección para el diseñador del sistema productivo. De estas iniciativas, destacan las energías renovables y el reciclaje de residuos, donde el modelo de suministro puede reabastecerse constantemente de entradas de recursos de sistemas abiertos.

Fig. 11. Etapas de Ciclo de Vida de producto. Fuente: L. Muñoz.



Sustentable económicamente	Usa materiales locales
	Usa materiales de bajo costo
Sustentable ambientalmente	Usa residuos como recursos
	Elimina materiales tóxicos y residuos
	Aumenta la eficiencia energética
	Aumenta el tiempo de vida útil
Sustentable socialmente	Usa materiales reciclables o biodegradables
	Es inocuo para la salud humana

Fig. 12. Atributos materiales basados en ecología industrial. Fuente: J. Molina; A. Wechsler.

Este estudio tomó como referente la investigación desde el diseño industrial que se enfoca en el material dirigido a la construcción. Un ejemplo concreto es el uso de cáscara de carozo de duraznos para la elaboración de tableros aglomerados usando distintos tipos de pegamentos, realizado por diseñadoras FAU (Parodi, 2006; Molina, 2016; Muñoz, 2019), así como el trabajo doctoral sobre reutilización de desecho de macadamia (Wechsler, 2013).

Estas entradas de recursos son posibles gracias a la abundancia de los subproductos de la gran industria, condición compartida con el potencial energético de los territorios no habitados y de difícil acceso del orbe. Por ello, el ambiente extremo, ya sea natural o devenido del impacto antropogénico, se presenta como un laboratorio de posibilidades de materialización.

2.1.2 Recursos circulares de ambientes extremos globales y chilenos

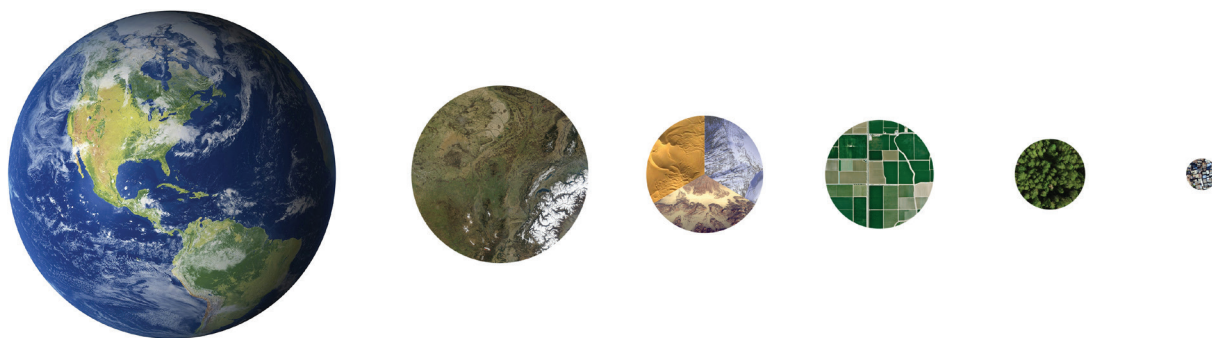
Alineados sobre el interés de esta investigación, los entornos extremos presentan cualidades esenciales para el establecimiento de relaciones de producción circulares: recursos materiales y energéticos en abundancia.

Por *extremo* entendemos aquello “que está en su grado más intenso, elevado o activo; que es alejado o distante; el punto último al que puede llegar algo” (RAE, 2019). Los lugares de condiciones extremas se encuentran en la frontera física de nuestra civilización y, lógicamente, están deshabitados por su condición distante, ajena y peligrosa. Actualmente el vínculo entre hombre y medio natural, si bien esencial, ha perdido su connotación de riesgo, en referencia a etapas donde nuestra supervivencia dependía del dominio sobre estos factores ambientales adversos.

El entorno urbano construido de forma artificial por el hombre, no solamente incluye los espacios de vivienda, trabajo y recreación, sino que los mismos necesitan de zonas dedicadas a la mantención de nuestra alimentación y producción. El espacio habitado por nuestra especie es de 0.6% de las tierras emergidas, y aquellos que sustentan a los primeros son el 12.6% para cultivos y 31.5% para zonas de praderas (Latham et al., 2014), restando un 55.3% de superficie ocupado por bosques, junglas, desiertos, humedales y hielo.

Sin considerar los biomas más accesibles, como el bosque húmedo templado, estas zonas restantes presentan una serie de inconvenientes respecto a dos condiciones fundamentales en el establecimiento de la vida humana, además del oxígeno y el agua: la variación térmica y la presión atmosférica, de los cuales se puede desprender una relación expresable en términos geográficos de latitud y la altitud.

Fig. 13. Relación de uso de superficies terrestre: emergidas, no habitadas, agrícolas, boscosas y urbanas. Elaboración propia.



La configuración atmosférica del planeta responde a la exposición desigual de la energía proveniente de los rayos del sol y al movimiento rotatorio terrestre. El intercambio de energía y materia produce un sistema termodinámico abierto basado en la convección, o la transferencia de calor a través de los fluidos que componen la atmósfera. Esto origina un movimiento basado en la constancia de entrada y salida respecto a la energía total del sistema.

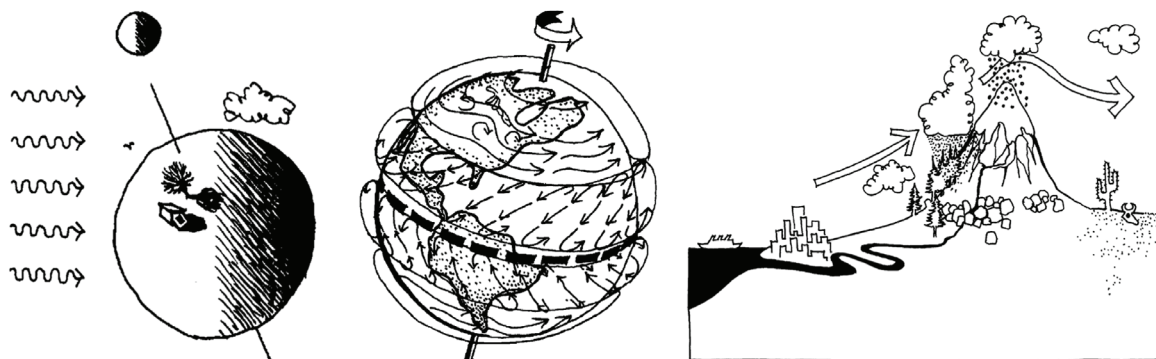
El movimiento de fluidos en el nivel superior forma celdas de convección, donde la presión atmosférica fluctúa según su posición sobre el globo al intercambiar calor con las plataformas continentales. Las masas oceánicas reciben la mayor parte de los rayos solares, por lo que liberan partículas de vapor que forman las nubes. Las mismas son arrastradas por el viento a través de los continentes, regulando la cantidad de radiación solar que reciben, lo cual define las regiones climáticas.

Dentro de la clasificación climática, las zonas templadas son las que presentan mejores condiciones para la habitabilidad humana, siendo los climas restantes los menos habitados. Estos son, según la definición de Köppen: tropicales, áridos, fríos y polares.

La temperatura y merma de vegetación de las zonas de frío permiten relacionarla a las polares. El nivel tropical sólo coincide con los desiertos en las altas temperaturas. Su posición geográfica, cercana a la celda de convección ecuatorial, enfrenta una presión de tipo húmeda que produce condiciones que sustentan gran diversidad biológica.

El sistema se completa con la altitud de los relieves orográficos, la cual expone la masa continental a la radiación, vientos, permafrost, así como a la disminución de la presión atmosférica, rompiendo los patrones latitudinales y distribuyendo las características más propias de los ambientes polares al resto del globo.

Fig. 14-16. Incidencia rayos solares, celdas de convección con vientos predominantes, ciclo húmedo continental. Fuente: E. Allen.



Desértico

Comprenden áreas donde se producen pocas precipitaciones, con condiciones ambientales muy hostiles para la vida en general. Cerca de un 15.2% de la superficie terrestre es árida o semiárida (Latham et al., 2014). Además, se caracterizan por sus altas temperaturas y gran oscilación térmica.

La falta de precipitaciones conlleva a la carencia de humedad y filtro de rayos solares, por lo que podemos encontrar temperaturas entre -10 y 50°C. La máxima temperatura registrada fue de 58°C, en Libia. La mayor oscilación térmica, de 32°C, se dio en Canchones, Tarapacá (Alonso, 2012).

Debido a su alta exposición a la luz solar, estas zonas presentan el mejor potencial de energía solar de todo el planeta, donde destaca el desierto de Atacama con 9 kWh·m⁻² diario, o más de 3000 kWh·m⁻² anuales (Alonso, 2012).

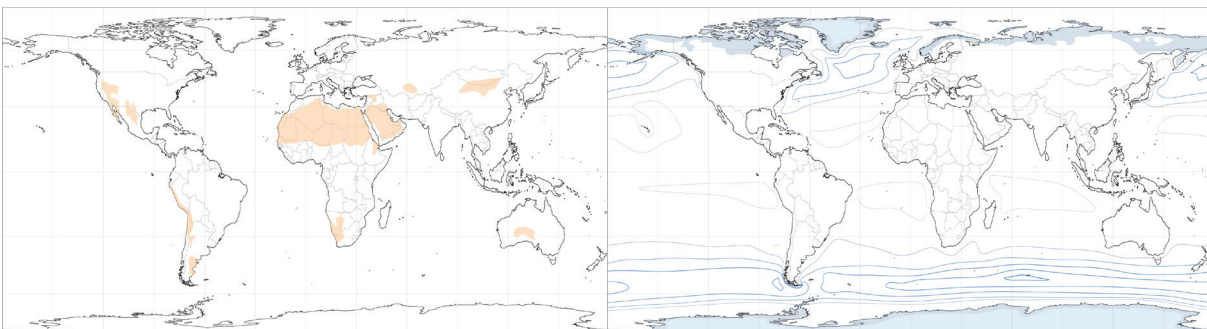
Polar

Representan un 9.4% de las tierras emergidas (Latham et al., 2014). Carecen de precipitaciones, tienen baja humedad, vientos intensos y la menor cantidad de radiación solar. Estas condiciones definen dos climas: de tundra y glacial, donde se forman casquetes de hielo que impiden el desarrollo vegetal.

Los registros térmicos más bajos se dan en el Polo Sur, donde promedia los -60°C en el invierno, y donde se registró la mínima de -89.2°C, en la base rusa de Vostok, en 1983. En el Ártico, el promedio de temperaturas de invierno puede ser 40° más cálido que en el primero.

Al Polo Sur lo rodea la corriente circumpolar Antártica, la mayor y la única continua, pues la presencia continental en el hemisferio norte interrumpe las corrientes árticas. Esta cercanía provee de fuertes vientos que pueden superar los 300 Km·h⁻¹.

Fig. 17 y 18. Zonas desérticas; zonas de tundra y polares. Elaboración propia.



Tropical

Localizadas entre trópicos, incluyen al total de bosques lluviosos, o selvas, del mundo, representando alrededor del 10% de las tierras emergidas. Su masa arbórea produce más del 30% del oxígeno de la atmósfera, y se considera que aloja a más de la mitad de las especies bióticas que se conocen. Tienen altas temperaturas y la humedad del aire es relativamente estable durante todo el año. Si bien existen variaciones, estos ecosistemas son siempre cálidos y húmedos debido a la poca alternancia estacional.

En cuanto a los registros ambientales más significativos, podemos mencionar la variación de temperatura, que se invierte en relación al entorno desértico, siendo tan baja que puede llegar a presentar diferencias anuales de menos de 3°C. Por otro lado, las precipitaciones pueden llegar a acumular 11873 mm anuales en ciudades de la India, como Mawsynram.

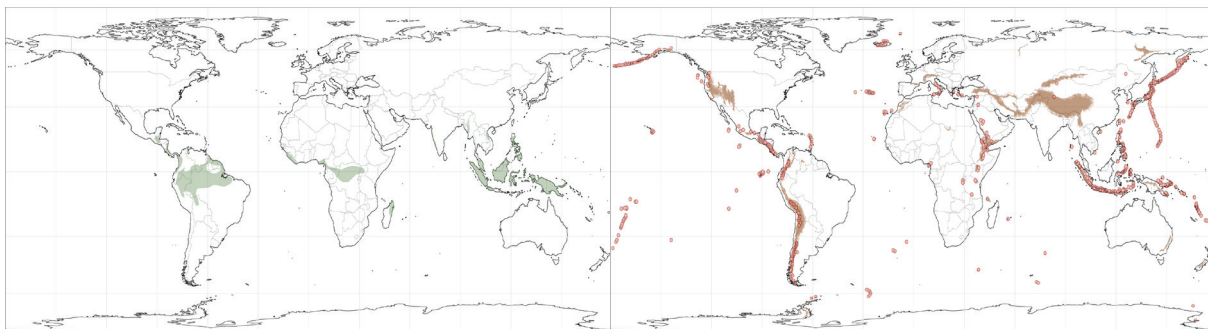
Alta montaña

Están vinculados a sistemas geoestructurales continentales, originándose debido al constante movimiento de las placas tectónicas de la Tierra. Cubren, según ONU, un 24% de la masa terrestre. Poseen complejas condiciones de clima, morfología, radiación ultravioleta, temperatura y presión atmosférica.

Entre los registros extremos se encuentra la mayor oscilación térmica mundial, de 56.7°C (mín. -48.9°C, máx. 7.8°C), efectuada en la parte norte de las Montañas Rocallosas en 1916. A su vez, se estima que las cumbres del mundo tienen 3'560,000 Km² de hielo (Bockheim, 2014).

Estas regiones presentan elevada actividad volcánica, y aunque su número es difícil de determinar, sólo han sido observados 552 volcanes con procesos eruptivos, contado Chile con 36 de ellos, es decir, el 7% de la actividad mundial (Kirk & Morris, 2017).

Fig. 19 y 20. Zonas tropicales; zonas montañosas. Elaboración propia.



Basura de océanos

La contaminación de los cuerpos de agua, es decir, de lagos, ríos, océanos, acuíferos y napas subterráneas, se asocia principalmente a la liberación de sustancias residuales de las zonas residenciales, agrícolas e industriales, las cuales pueden conducir a la degradación de los ecosistemas acuáticos y afectar la salud de los organismos que la consumen.

Aunque provienen de fuentes de difícil ubicación, terminan invariablemente su recorrido en el océano, siendo casi el 90% de estos desechos de origen plástico (Weisman, 2007), flotando a la deriva como masa deformada.

La NASA elaboró, mediante localización satelital y modelamiento de información de corrientes oceánicas, un curso proyectado de su deriva en los principales océanos del mundo (NASA, 2015), el cual puede observarse en el mapa de la Fig. 21.

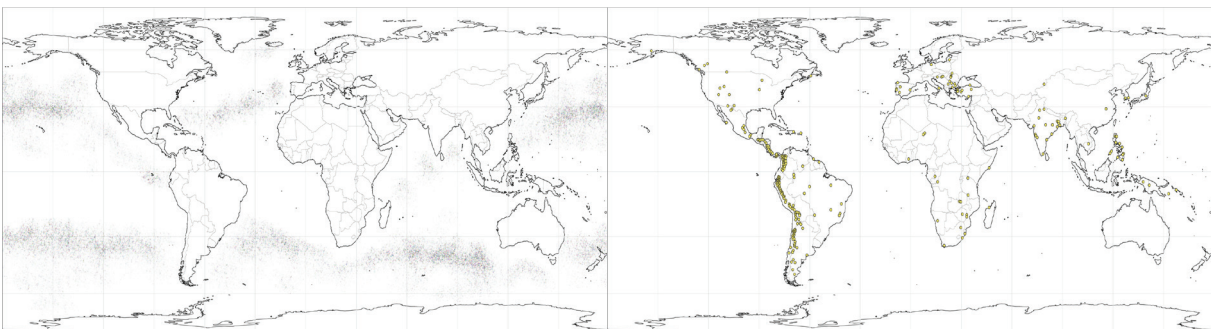
Impacto ambiental de minería

Al ser nuestro principal hábitat, la producción de elementos contaminantes del entorno terrestre es muy variada, pero se encuentra en estrecha relación con los procesos de industrialización.

Pueden señalarse vertederos, cultivos con sobreexplotación, así como industrias de energía, petroquímica, metalurgia y minería. Estas industrias suelen producir resistencia en las comunidades donde se alojan, produciéndose conflictos socio-ambientales cuya naturaleza es cuantificable y mapeable.

EJAtlas, o Atlas de la Justicia Ambiental por sus siglas en inglés, es una herramienta de mapeo colaborativo elaborada por las ONGs de Justicia Ambiental de EJOLT. Tomando el caso de los problemas socioambientales de la industria minera, dada su estrecha relación con la economía nacional, puede observarse una localización precisa de focos de contaminación asociados en Fig. 22.

Fig. 21 y 22. Movimiento proyectado de islas de basura; zonas de conflicto ambiental por minería. Fuente: NASA; EJAtlas.



La yuxtaposición de los mapas levantados permite dimensionar los territorios que presentan las características ambientales más hostiles del mundo (Fig. 23). Por su propia constitución, ellos habilitan una gran disponibilidad de recursos, expresados en términos de energías y materiales con gran perspectiva de renovación.

A su vez, el sistema actual de explotación de recursos naturales, base de la degradación de los ecosistemas, calentamiento global, acidificación oceánica, extinción masiva de especies y pérdida de biodiversidad, extiende el nivel de hostilidad ambiental a otras partes del planeta, alguna habitadas por seres humanos, saturándolo de objetos artificiales sin uso aparente, sus desechos.

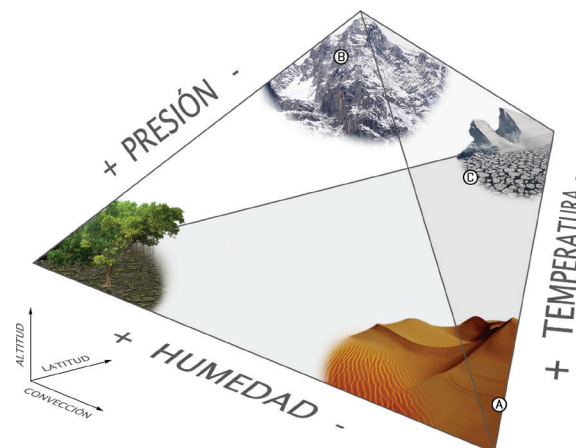
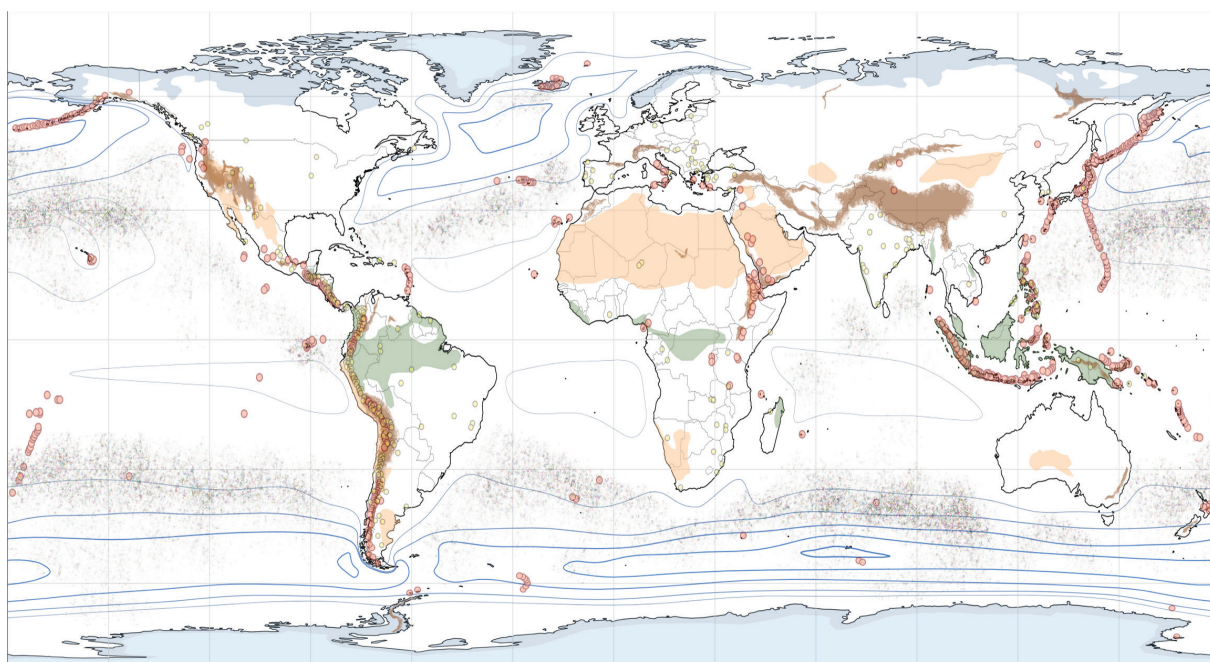


Fig. 24. Relación esquemática de ambientes extremos naturales chilenos frente a globales. Elaboración propia.

El territorio de Chile se encuentra ubicado entre ambientes naturales desérticos, polares, montañosos que presentan altas cantidades de energías y materiales renovables. A ello, se suma el potencial uso de recursos desechados por la gran industria.

Fig. 23. Zonas de condiciones extremas naturales y artificiales del planeta. Elaboración propia.



1. Energías renovables

La energía, propiedad cuantitativa que debe transferirse a un objeto para que produzca un trabajo físico, se considera renovable cuando proviene de fuentes cuyos tiempos de reposición se ajustan a los de explotación. De las observadas en el mapeo previo, destacan en Chile:

- Norte Grande - zona del mundo que más radiación recibe de todo el orbe. Posee promedio de radiación solar de **7 kWh·m⁻²** diarios.
- Antártida - zona con las más hostiles condiciones climáticas del mundo. Presenta vientos de hasta **300 Km·h⁻¹**.
- Cordillera de los Andes - zona con una de las mayores actividades volcánicas. Puede emanar temperaturas de más de **1200°C**, capaces de derretir roca.
- Costas con presencia de Camanchaca - fenómeno de niebla geo-dinámica que puede movilizar **7l·m⁻²** de agua diarios.



Fig. 25-28. Radiación solar, viento temporal, radiación geotérmica, niebla geo-dinámica. Fuente: B. Lee; NatGeo; ChileTravel; UNAP.

2. Material reciclado y de gran disponibilidad

Los recursos físicos sujetos a gran disponibilidad pueden ser considerados renovables. Los desechos abandonados de los diferentes sectores productivos poseen potencial de reutilización. En Chile tenemos:

- Áridos y rocas - minerales característicos de sectores desérticos, que guardan propiedades interesantes no explotadas.
- Nieve o hielo - agua en estado sólido en distintas presentaciones que se presenta en episodios constantes.
- Relave minero - mezcla de roca molida por procesos productivos mineros junto con agentes químicos en distintas proporciones y granulometrías.
- Basura oceánica - restos plásticos que flotan a la deriva movidos por corrientes marinas.



Fig. 29-32. Áridos desérticos, hielo y nieve, relave y basura oceánica. Fuente: C. Bolonia; H. Millman; C. Calam; C. Power.

2.1.3 Construcción sustentable low-tech y high-tech

En el pasado de la historia humana, la supervivencia explotó nuestra propia capacidad de manipular las circunstancias ambientales más desfavorables, siendo la materialización del entorno una respuesta primaria. Entonces, sus particularidades dependían, casi de forma exclusiva, a los componentes físicos próximos, los materiales locales.

En su desarrollo temprano, las técnicas de manufactura aprovecharon los materiales de gran disponibilidad en la naturaleza para producir objetos y estructuras simples. El uso de la tierra en el adobe, cob, tapial, quincha; de la roca, en sillerías y mamposterías; de todo tipo de maderas en sencillos entramados y ensambles; y del hielo, como la estructura ártica del iglú, con el paso del tiempo, pasó a entenderse como expresión arquitectónica vernácula.

La construcción espontánea, popular, sin arquitectos, se basa en tradiciones técnicas sencillas, *low-tech*, sobre un sentido de sostenibilidad tanto en lo social como en lo económico, produciendo estructuras “prácticas, con alta eficiencia energética y armoniosamente combinadas con el paisaje” (Reid & May, 2010).

Soslayando sus aspectos más intrínsecos, como su influencia en la expresión cultural de las comunidades que la practican, es destable la importancia que dichas tradiciones otorgaron y siguen otorgando a la relación con el entorno físico, cuya intimidad se manifiesta en la semejanza entre el edificio y su contexto.

La observación de estructuras pasadas nos acerca a esta relación cercana, o al menos, más directa, con las fuerzas del entorno y, además, permite asumir una posición menos prejuiciada desde donde se simplifican las perspectivas técnicas del diseño material.

Fig. 33-35. Construcción vernácula: choza de huesos de mamut, dolmen neolítico, sillería inca. Fuente: NatGeo; H. Bieser; B. Gagnon.



Una de las características más notables de los seres vivos, incluida nuestra especie, radica en la necesidad de extendernos en el espacio. Al igual que en el pasado precario de la humanidad, la sociedad extiende sus confines hacia los territorios próximos que yacen inexplorados. Por ello, la fundación de bases permanentes en la superficie de otros planetas, un desafío científico y cultural moderno, representa la oportunidad de volver a enfrentar un ambiente completamente extremo.

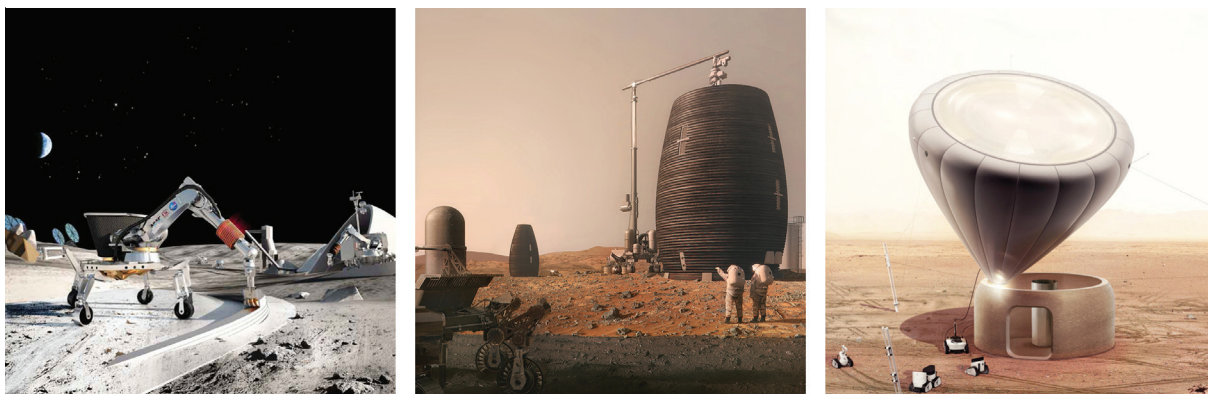
En gran sintonía con principios sustentables, el foco del diseño de habitáculos para el asentamiento extraplanetario está puesto en soluciones que reduzcan el alto costo de enviar objetos al espacio (Davis, 2018). Para ello, se aplica la estrategia ISRU, Utilización de Recursos In-Situ, que es el empleo de recursos encontrados o fabricados en otros cuerpos celestes, dentro del contexto de una misión espacial, incluyendo, entre otros, a los materiales de construcción.

Entre los principales sistemas constructivos ISRU que las agencias espaciales han comenzado a desarrollar, destaca el uso de la roca regolito con aglutinantes mediante brazos robóticos para su deposición. Existe, también, interés en el uso de radiación solar, ya sea mediante paneles solares, así como en su directa interacción con los materiales.

Algunos cuerpos celestes carecen de una atmósfera lo suficiente densa para menguar la potencia de la energía solar. Para estos escenarios, se ha proyectado el uso de concentración solar en mecanismos muy parecidos al del “Solar sinter”. Estas perspectivas, aunque altamente científicas, han permeado en la cultura del diseño a través de concursos como el 3D Printed Habitat Challenge de la NASA.

De esta forma, tanto las estrategias ISRU como la construcción vernácula descansan en preceptos lógicos y prácticos, pero sobre todo, circulares, para su materialización.

Fig. 36-38. Construcción ISRU: Contour crafting, basalt composite printing, Solar crafting. Fuente: NASA; AI Space Factory; SolarCrafting.



2.2 Materiales constructivos desde desecho minero

Los principios de sostenibilidad en la construcción parten en la elección de la materia prima, en cuanto es el origen, o la entrada más gravitante, al momento de medir el impacto de una línea de producción. Por ello, y en concordancia con los atributos materiales basados en la ecología industrial, esta investigación persigue la reutilización del desecho minero del relave para el desarrollo de materiales de la construcción.

Actualmente, en el mundo existe un activo interés por encontrar maneras innovadoras de usar este material. Esto es notable también en nuestro país, gracias a programas e incentivos, públicos y/o privados, a la investigación en torno al tema. Sin embargo, suele suceder que esta es desarrollada y fomentada por la misma industria que lo produce, generándose una desconexión con respecto a la parte de la población que necesita ese beneficio.

Esto se debe a que, en general, el interés de la industria está puesto en la recuperación de aquellos elementos con valor económico, como hierro, cobre, molibdeno y cobalto, que no fueron posibles de obtener en un primer proceso minero. Esta postura, lamentablemente, hace gala de los objetivos lineales de explotación de la gran minería.

De todos modos, la tecnología desarrollada para el tratamiento de esta materia debería asegurar niveles de separación con estos elementos metálicos. De esta forma, podría ser muy beneficioso, ya que se habilitaría un gran volumen de material no metálico utilizable para desarrollar materiales de la industria cerámica, y con ello, disminuir este ingente pasivo (Ulloa et al., 2009).

Alineada con estas consideraciones, una parte de la investigación en torno al uso del relave en la construcción se enfoca en la sinterización del árido para la fabricación de elementos modulares, aunque también se utilizan procesos como geopolimerización (Ahmari, 2011), o se apunta a la sustitución de áridos para morteros (Choi et al., 2009; Pradena et al., 2019). Esta sinterización, sin embargo, dista del proceso SLS, y guarda poca relación con el “Solar sinter”.

Como se revisará más adelante, la sinterización es un proceso térmico sobre material granular muy complejo y variado, que usualmente hace uso de cámaras presurizadas para disminuir la temperatura y con ello volver más eficiente el importe energético. También se revisarán los requerimientos térmicos de este sistema, sin pasar por alto la situación actual del desecho minero en Chile, levantando información pertinente sobre sus propiedades físicas más importantes.

2.2.1 Industria de la gran minería chilena

El sector minero es fundamental para el funcionamiento de la economía chilena, reportando las exportaciones del cobre casi un tercio de los ingresos del gobierno. Esta actividad económica se concentra en la región del Norte Grande, y por ende, se emplaza a los largo y ancho del desierto de Atacama. Los minerales explotados en Chile son el cobre, oro, plata, molibdeno, hierro y carbón.

Esta actividad, importante desde la Colonia, se transformó en la principal industria a nivel nacional en el siglo XIX. Hasta comienzos del siglo pasado, la ausencia de conciencia ambiental impidió una evaluación de sus impactos negativos. En los 60s se produjo su “chilenización”, donde el Estado se asoció a capitales extranjeros, implicando un auge en la producción, hasta que, en los 70s, se hizo cargo de las minas más importantes. En la dictadura, su “liberación tributaria” fue determinante en el aumento de la producción y consiguiente empeoramiento del impacto ambiental (BNC, 2018).

Actualmente, la producción nacional del cobre representa el 96% del total, con unos 5'872,027 de toneladas métricas finas (Sernageomin, 2018).



Fig. 39. Mapa minero de Chile 2019. Fuente: DirecMin.

El cobre es un mineral metálico que no se encuentra puro en la naturaleza. El proceso geológico que forma sus yacimientos implica su disolución en aguas termales que fluyen desde los magmas y que brotan a través de fracturas rocosas.

Los procesos de obtención del mineral son por flotación y lixiviación, que lo separan de los minerales que lo contienen, dependiendo de su procedencia. El primero se usa si se encuentra sulfurado, usando agua; el segundo se aplica a los oxidados y sulfurados secundarios mediante ácido sulfúrico.

Las etapas del proceso de producción de cobre procedente de óxidos son: extracción, chancado, lixiviación y precipitación electrolítica. En el caso de los minerales sulfurados son: extracción, chancado, flotación (concentración), fundición, refinación y moldeo, y electro-refinación (MinMinería, 2018).

Las principales aplicaciones del cobre son cables eléctricos (60%), techos y plomería (20%) y maquinaria industrial (15%). El cobre se usa principalmente como metal puro, pero cuando se requiere una mayor dureza, se coloca en aleaciones como el latón y el bronce (5% del uso total).

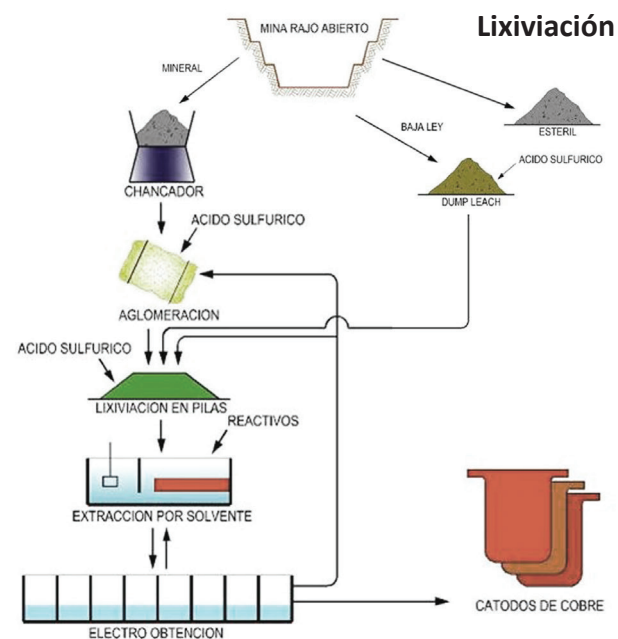
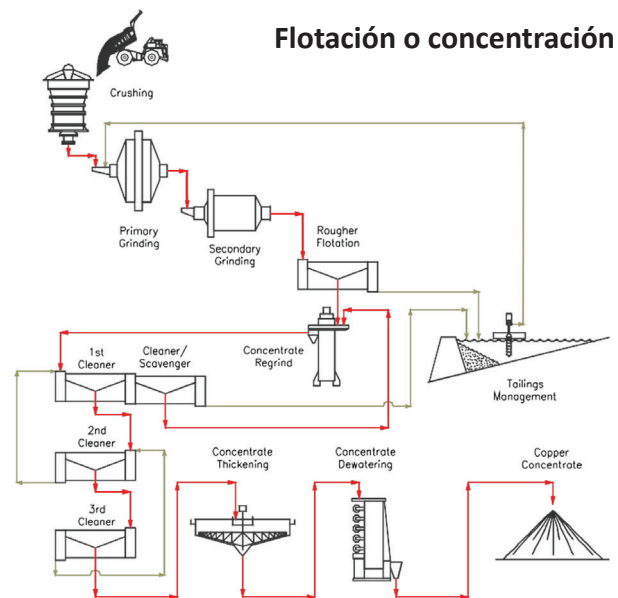
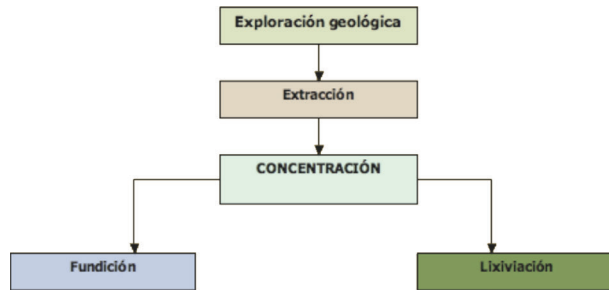


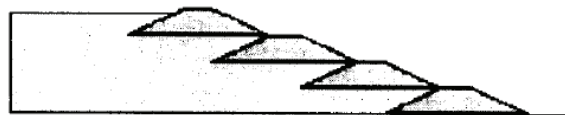
Fig. 40-42. Diagramas de flujo de procesos de flotación y lixiviación del cobre. Fuente: J. Aguilar; IDMine; MiningTech.

1. Impacto ambiental de la minería

La explotación de los recursos minerales es necesaria para el fomento de la economía y la satisfacción de las necesidades materiales de la sociedad, pero también genera una cantidad desmesurada de desechos, los cuales pueden ser contaminantes del medio ambiente, de manera significativa si entran en contacto con las napas subterráneas y los cuerpos de agua. Si el desecho se vierte de forma impropia en torno a una faena minera, el flujo de material durante episodios de lluvia puede “reducir la fertilidad de las tierras agrícolas cercanas” (Lamani et al., 2016).

Dentro de estos residuos se encuentran: las escorias, de la pirometalurgia; los rípios, de la hidrometalurgia; el material sin o con poco valor económico denominado estéril y los relaves, originados principalmente de la etapa de flotación. Estos dos últimos constituyen el mayor problema debido a su cantidad y volumen.

Aguas Arriba



Aguas Abajo



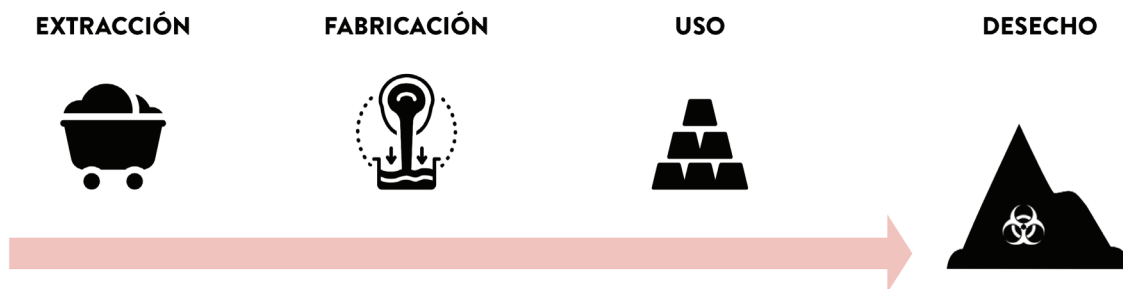
De Línea Central



Fig. 44. Tipos de tranques de relave. Fuente: Cámara Diputados.

El relave es un material de descarte devenido del proceso de concentración en la fase de flotación. Se compone de fragmentos de roca sometida a molienda, en una suspensión acuosa. En Chile, en promedio, se generan 80 toneladas de relave por tonelada de cobre producido (Ulloa et al., 2009). Estos desechos se almacenan en obras de ingeniería llamadas tranques y tortas (Fig. 44).

Fig. 43. Modelo de producción lineal de la industria de la gran minería. Elaboración propia.



Un tranque es un estanque donde se dispone del árido de manera escalonada mientras realiza el proceso natural de separación con el agua, producto de su evaporación. La composición química del relave depende de varios factores: el mineral explotado en la mina, los procesos químicos utilizados, la antigüedad de las técnicas, etc.

Estos elementos no fueron considerados con utilidad alguna por mucho tiempo (Chindris, 2017). Por ello, uno de sus efectos más negativos reside en su acumulación en inmensas cantidades de superficie de suelo, el cual queda desprovisto de flora y fauna.

Otro impacto son los accidentes relacionados a la estabilidad física y química de los depósitos. Fallas estructurales han devastado territorios y causado pérdidas de vida humana, reforzando la imagen de la minería como una actividad peligrosa e indeseable.

El consumo de agua para la minería, para el caso del cobre, es de un 3%. Esta cifra es muy inferior comparada a la del sector agropecuario, del 82% (DGA, 2016). Por otro lado, el consumo energético tiene un impacto mayor, alcanzando el 14% también para el sector cuprífero, y casi la mitad proviene del uso de diésel. Los procesos que más consumen energía son la Mina Rajo, con 77% de combustible, y la Concentradora, con 57% de eléctrica (CoChilCo, 2018).

El impacto del relave exige una normativa que lo caracterice. Este material lo regula: Ley 20.417, mod. Ley 19.300, somete a Evaluación de Impacto Ambiental (EAI); Reglamento de EAI, establece permisos ambientales; Reglamento Sanitario sobre Manejo de Residuos Peligrosos, impone deberes para quienes lo posean y establece pautas de clasificación; D. S. N° 248, rige construcción, diseño, operación de depósitos, y establece a Sernageomin como fiscalizador; y Ley 20.551, norma el cierre de faenas, y suscita Plan de Estabilidad Química y Física, que dispone etapas de evaluación, monitoreo y asegurado (Villanueva, 2019).

Como se ha mencionado, existen varias posibilidades de mitigación de los efectos negativos de la producción de desechos mineros. Así como hay esfuerzos para llevar este pasivo a la industria de la construcción, existen otras áreas potenciales para su reciclaje, por ejemplo, como material fertilizante.

La Guía Técnica CORFO de Recuperación de Elementos de Valor en Depósitos de Relaves establece objetivos para iniciativas del sector público y privado. Forma parte de la agenda estratégica gubernamental sobre desarrollo minero a largo plazo. Establece 3 ámbitos para el sector: Minería Virtuosa, Incluyente y Sostenible, los cuales ayudan a sus actores a identificar prioridades estratégicas.

2. Propiedades geoquímicas del relave

Cada año, Sernageomin elabora una caracterización geoquímica de todos los depósitos registrados en Chile. La información se obtiene de muestras tomadas en terreno. Hasta el año 2020 se tomaron 2186 muestras, de 640 depósitos que figuran entre los 740 catastrados.

En el documento se recalca que, dada la antigüedad de la práctica minera en Chile, existen relaves no sujetos a norma, cuya composición y localización se desconoce. La caracterización geoquímica cuantifica la concentración de 56 elementos:

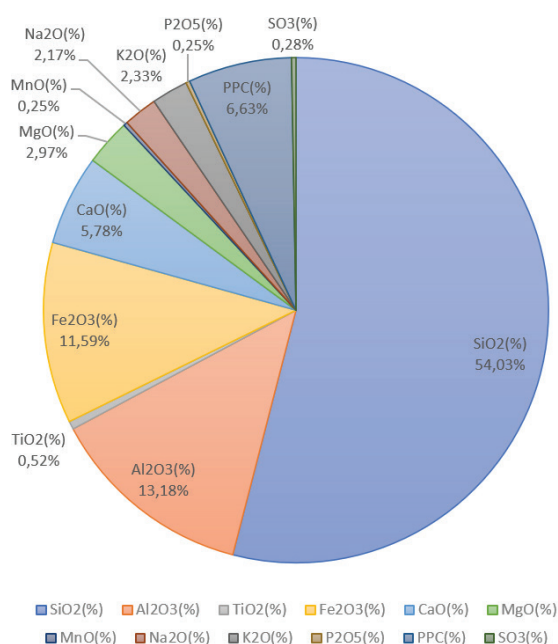
- 12 elementos mayores formadores de minerales que componen la roca, expresados como óxidos: silicio (SiO₂), aluminio (Al₂O₃), titanio (TiO₂), hierro (Fe₂O₃), calcio (CaO), magnesio (MgO), manganeso (MnO), sodio (Na₂O), potasio (K₂O), fósforo (P₂O₅), azufre (SO₃) y compuestos calcinados.
- Contenido porcentual de azufre.
- 30 elementos comunes en trazas (por debajo de 1%): cobre, vanadio, cromo, cobalto, níquel, zinc, rubidio, estroncio, circonio, niobio, bario, plomo, cesio, hafnio, tantalio, arsénico, escandio, itrio, molibdeno, antimonio, estaño, torio, plata, cadmio, bismuto, wolframio, uranio, oro, y mercurio.

- 14 tierras raras elementales: Lantano, cerio, praseodimio, neodimio, samario, europio, gadolinio, terbio, disprosio, holmio, erbio, tulio, iterbio, y lutecio.

Los elementos mayores conforman el 99.06% de la masa total, y son inocuos. El restante 0.94% podrían generar una concentración objetable para ecosistemas y salud humana. Los principales compuestos de connotación ambiental son: cobre, cromo, níquel, cinc, plomo, arsénico, cadmio y mercurio (Sernageomin, 2020).

Finalmente, sus principales compuestos, SiO₂, Al₂O₃, CaO y Fe₂O₃, presentan distintos puntos de fusión, 1710, 1565, 2572 y 2072°C, lo que producirá una mixtura en se fase de vitrificación.

Fig. 45. Elementos mayores total muestra. Fuente: Sernageomin.



2.2.2 Cerámicos de relave

La literatura que trata la valorización del desecho minero en la industria de la construcción señala a la fabricación de ladrillos como uno de los materiales de construcción más idóneos para su incorporación (Lamani et al., 2016; Chindris et al., 2017). De la misma se extrae una revisión crítica de la utilización de los desechos mineros para la fabricación de ladrillos.

Chindris et al. indican que los relaves ricos en manganeso han sido usados en la industria forestal y del vidrio, ya que puede fusionarse, mientras que aquellos ricos en arcillas han sido usados para hacer ladrillos, baldosas de piso y cemento, por sinterización. También indican que su uso como sustituto de arena de río en morteros podría reducir su sobrexplotación.

Por otro lado, Lamani et al. presentan un análisis más profundo sobre la utilización de este residuo para fabricar ladrillos. Para lograr este propósito, recopilan una extensa cantidad de investigaciones en torno al tema, y luego los detallan, presentando técnicas, composiciones y datos de ensayos mecánicos sobre la base de una clasificación de ladrillos según su proceso de manufactura, y también sobre las prestaciones de relaves resultantes de diferentes minerales.

El análisis mostró procesos que utilizan técnica tradicional de mezcla con agua, formado, secado y cocido; en autoclave y curado sin cocido; en autoclave sola; con geopolimerización; y por sinterizado.

Este último proceso se usó para la elaboración de losetas cerámicas usando compuestos que incluían relave de hierro en limo, además de cenizas volantes y escoria de horno. Demostraron una disminución del uso de energía y costos de producción más bajos. Estas losetas presentaron alta resistencia y dureza en comparación con las losetas convencionales.

El desecho más extendido para este uso origina del hierro (Jian et al., 2011; Ranfang et al., 2012; Deng, 2012; Karhu et al., 2018). Por otro lado, para los relaves de mineral de cobre se han aplicado técnicas de geopolimerización y de curado en autoclave (Lamani et al., 2016), con mezcla acuosa.

Se pudo notar que no existe un proceso igual al "Solar sinter" en la literatura de la valorización de relaves para fabricación de ladrillos. Comparten la composición geoquímica, dimensión granulométrica y transferencia de calor sobre partículas, pero difieren en la aplicación de energía térmica, en la mixtura con aglomerantes y fundentes que bajan su punto de fusión, y en la aplicación de presión.

1. Proceso térmico

Es necesario ahondar en las diferencias entre el proceso de "Solar sinter" y la sinterización. El sistema con lente de Fresnel concentra, de forma heterogénea, un punto focal con temperaturas cercanas a los 1400°C (Riatega, 2012; Morris et al., 2017), diferentes a las de la cocción de ladrillos por sinterización cerámica (1100°C).

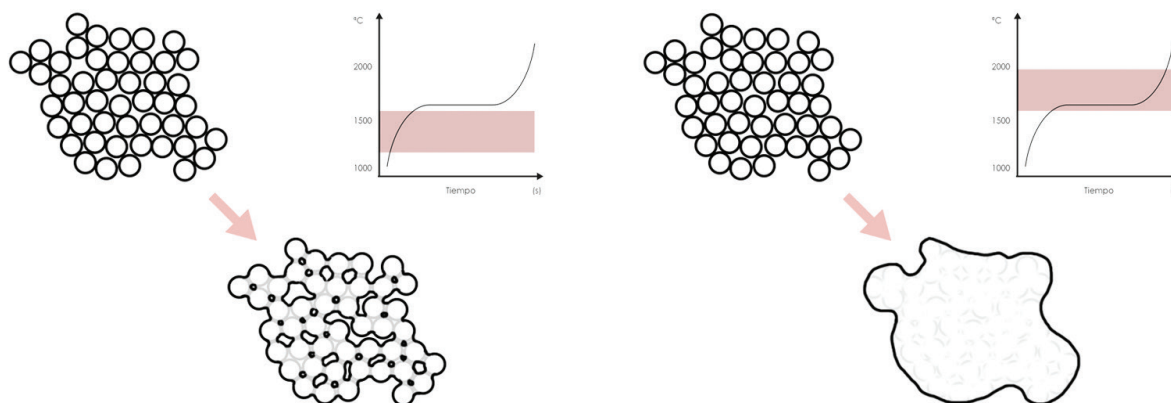
Este tratamiento térmico une partículas en una estructura sólida mediante calor y/o presión sin llegar a su punto de licuefacción, y forma parte de la cocción de cerámicos, como la porcelana, ladrillos y vidrios.

El proceso clásico de sinterización de polvos incluye la mezcla con agua y aglomerantes, secado, compactación, cocción de baja temperatura para evaporar aglomerante y de alta temperatura para fusionar las partículas de la cerámica (Shatokha, 2012).

La impresora solar de Kayser es en realidad un fusionador de partículas de aplicación no uniforme. Derrite aquellos granos más cercanos al punto focal y sinteriza aquellos más periféricos. El sistema SLS, del cual se inspira, actúa sobre polvos metálicos que cohesionan con firmeza. Otros procesos de sinterización industrial usan cámaras presurizadas, con alta eficiencia térmica.

El "Solar sinter", aplicado al relave, llevará a los aluminosilicatos a su fase líquida, mientras que CaO y Fe₂O₃ se aglomerarán. Al vitrificarse, es decir, al estabilizar sus enlaces moleculares, se formará una roca vítrea similar a la obsidiana, de gran dureza, pero muy frágil. Para mejorar esta situación, se necesitará mezclar el relave con otros elementos que podrían actuar como fundentes, disminuyendo el punto de fusión de la mezcla, lo que, en combinación con agua, hidrogenará los aluminosilicatos como en la cerámica tradicional.

Fig. 46. Comparación de procesos de tratamiento térmico en partículas sinterizadas y fusionadas. Elaboración propia.



2.3 Manufacturas aditivas cerámicas

Se ha mencionado que el material cerámico es parte de un proceso térmico de cohesión uniforme de partículas aglomeradas de arcilla, a veces bajo presión. El relave fundido forma un material vítreo, distinto al concepto común de cerámico, lo que se presta a confusiones. Por esto, es necesario establecer que es un material cerámico. Se aprovechará este subcapítulo para tratarlo, ya que, al combinarse con técnicas habilitadas por el diseño digital, su manera de materializarse también se amplía.

La ciencia clásica de materiales agrupa su universo dentro de 5 categorías: (1) metales, (2) polímeros, (3) cerámicos, (4) semiconductores y (5) compuestos. A pesar de la simpleza de esta lista, no es posible definir al cerámico, o de hecho clase de material, en términos de propiedades específicas (Carter & Norton, 2013).

Aunque se le asocia con una "mixtura" de enlaces, una combinación covalente, iónica y, a veces, metálica, su definición más extendida es de "sólido inorgánico no-metálico". La mayoría se compone de metales, metaloides y no-metales, formando óxidos, nitruro y carburos, pudiendo, el diamante y el grafito, también denominarse cerámicos (Carter & Norton, 2013).

En realidad, la fusión de áridos de relave, compuesto principalmente de silicio y alúmina, no pasa por un proceso tradicional de producción cerámica, esto es mezclado, secado y cocido. A su vez, por definición, un material no puede denominarse cerámico si se funde. El vidrio, sin embargo, lo hace.

El vidrio mantiene su propia forma, pero es, en realidad, un líquido super enfriado, propiedad se manifiesta a elevadas temperaturas, sobre el punto de fusión del cuarzo que lo compone. Esto se debe a que el vidrio es un cerámico especial (Carter & Norton, 2013).

Lo común es pensar en el vidrio como un material traslúcido que se encuentra en ventanas de edificios y vehículos. Pero el término vidrio es en realidad un estado de la materia donde los átomos y moléculas están dispuestos aleatoriamente. El material árido del relave, compuesto de elementos comunes con las arcillas y rocas, formará un vidrio, pero ese mismo material vitrificado será, en esencia, un tipo especial de cerámico.

El presente trabajo, más que definir el material en sus exactas propiedades moleculares, busca entenderlo desde sus posibilidades de reutilización para la conformación de sistemas constructivos más accesibles y sustentables.

Una manufactura aditiva es un sistema de prototipado que busca generar volúmenes incorporando materia. Este tipo de diseño tiende a acumular y crecer, y teóricamente puede extenderse según la disponibilidad de los recursos. Estos sistemas pueden tener fases donde sus elementos están sueltos, y también donde se convierten en un solo material coherente.

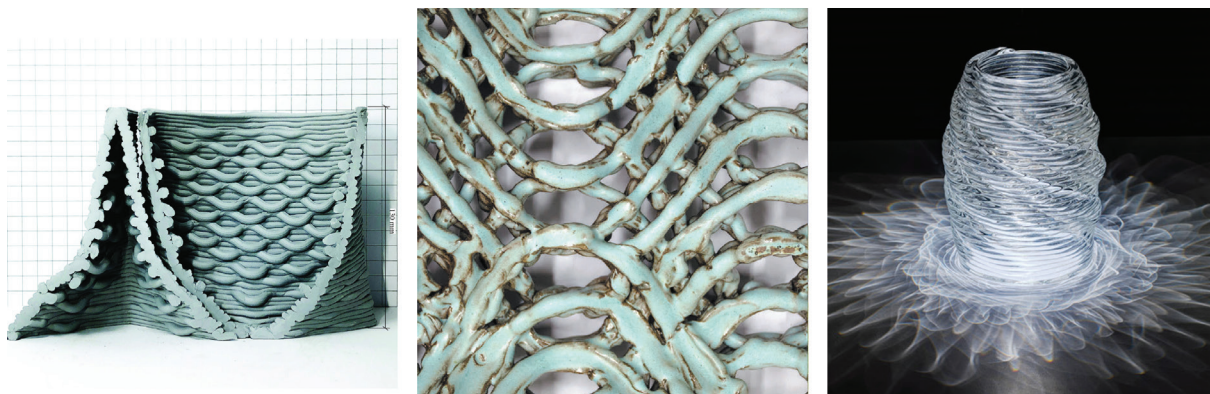
Las manufacturas aditivas, en general, comprenden el mayor número de las técnicas de fabricación digital. Entre ellas encontramos: fotopolimerización, fusión de cama de polvo, de extrusión, chorro de material, laminación, chorro de pegamento y por energía de deposición directa (Gibson et al., 2015). Una búsqueda intensiva en la base de datos CumInCad da cuenta que su número se reduce a sólo dos clases para aquellas basadas en el uso de cerámicos: la deposición por extrusión y el vaciado en molde.

Si organizamos los resultados de esa base de datos en una línea temporal, estos reportan un auge considerable de investigación y exploración material con manufacturas aditivas basadas en cerámicos, siendo el 2019 un año especialmente productivo con 9 publicaciones, casi un tercio de las que se han reportado desde 2004.

Distribuido por temáticas, es posible observar un patrón en el estudio de estos sistemas materiales. El 37%, o sea, 17 de 45 investigaciones, se enfocan en aspectos formales, geométricos, estéticos. El resto, se distribuyen muy equitativamente en 4 temas: performance o acondicionamiento, organizacional o sistémico, heurístico o de proceso y, por último, estructural o material.

La simplificación del sistema "Solar sinter" de este trabajo se orienta a este último, si bien la técnica no se encuentra en la literatura, asemejándose más a la cama de polvo.

Fig. 47-49. Sistemas de MA cerámica: Guiding Instability, Clay Non-Wovens, Mediatted Matter. Fuente: J. Shi; D. Rosenwasser; N. Oxman.



2.3.1 Impresión 3D en la escala constructiva

El advenimiento de la cultura digital desprendida de los avances tecnológicos del siglo pasado hizo posible entender nuevos modelos de representar, diseñar y fabricar. Las tecnologías CAD sirvieron de punto de partida, en cuanto modelos vectoriales matemáticos se volvían una herramienta más rápida y precisa de comunicación de ideas. Esto impulsó a los diseñadores a explorar territorios que no presentaban relaciones aparentes con la disciplina.

Este cambio cultural se basó, también, en una respuesta al modelo estandarizado del Mov. Moderno, en cuanto las tecnologías digitales suponían una revelación a sus preceptos, tornándose en herramientas idóneas para proveer lo que se creía en falta: diferenciación, variación y elección.

Mario Carpo discutió que la idea de una notación genérica, con fin abierto, paramétrica, implicaba que la posibilidad de autoría podía compartirse (Carpo, 2012), entre el diseñador, que establece las reglas del juego, y un usuario, que puede elegir los parámetros según sea su conveniencia. De esta forma, estas tecnologías de fabricación e información se volvieron una oportunidad de recobrar nuestra capacidad de decidir y reconocernos en lo creado.

El proceso de manufactura aditiva de la impresión 3D ha gozado de un moderado éxito en su redimensionamiento hacia la escala habitable humana. Actualmente existe un consistente desarrollo en la investigación de esta técnica. Los sistemas más comunes de impresión 3D en la macro-escala son:

- Contour crafting. Una de las técnicas de impresión 3D más antiguas, se basa en la extrusión por capas de pasta a base de cemento que es esparcida con una paleta para lograr un acabado liso.
- Concrete printing. Se basa, también, en la extrusión de mortero de cemento. Logra una deposición con mayor definición gracias a su capacidad de retener libertad en los 3 ejes.
- D-Shape. Deposita polvo en capas que se endurecen mediante la incorporación de un aglutinante. Una vez que el objeto impreso está completo, debe extraerse del lecho de polvo suelto.

El aspecto más importante de estas técnicas radica en su capacidad de trabajar sobre la superficie del suelo de manera directa. En comparación, el sistema "Solar sinter" está diseñado para operar sobre una mesa de trabajo, que reduce el tamaño del material a un modulo o pieza.

1. Extrusión vs. cama de polvo

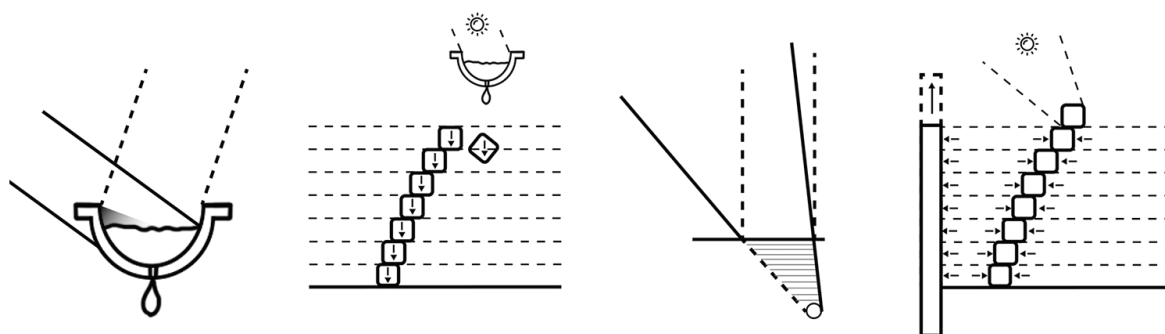
Si bien existen otras técnicas que pueden extruir material, en esta se utiliza calor para fusionar, usualmente, un carrete con un filamento de polímero enrollado, dentro de un cabezal portátil. Mediante un sistema presurizado, el material se expelle a través de una boquilla de anchos variables. Los sistemas extrusivos, los más extendidos actualmente en el mercado, funcionan siguiendo una secuencia de cargar, fundir, presionar, extruir, mover y pegar.

Su homologación al sistema de concentración solar Fresnel demandaría de una cámara presurizada capaz de soportar temperaturas de casi 1500°C, además de cumplir con todos los otros parámetros de la secuencia extrusiva. Sin embargo, la deposición de una materia que está en proceso de vitrificación resultaría en el enfriamiento prematuro y el consiguiente resquebrajamiento de lo depositado.

La Fusión en Cama de Polvo está basada en la deposición sucesiva de capas de material en gránulos muy finos, para fundirlas con una fuente de energía. Es uno de los procesos de manufactura digital más longevo. El SLS, de hecho, fue el primer proceso comercial de la FCP. La fuente térmica más común en estos sistemas utiliza rayo láser. Estos procesos se desarrollaron originalmente para producir prototipos de plástico utilizando una técnica de escaneo láser. Este enfoque se extendió posteriormente a los polvos metálicos y cerámicos (Gibson & Stocker, 2015).

Naturalmente, este sistema posee gran similitud con el "Solar sinter" pues este último se basó en él. Su principal diferencia radica en que la fuente de calor que cohesiona las partículas cae perpendicular a la superficie que las contiene. El sistema de Kayser, posee un problema en su entrada energética: no sólo oscila el flujo de energía solar, sino también el área de concentración, dificultando mucho la definición.

Fig. 50 y 51. Modelos de sistema extrusivo y de cama de polvos en relación a la técnica de concentración solar de árido. Elaboración propia.



2.3.2 "Solar sinter" de Markus Kayser

El proceso del diseño del mecanismo "Solar sinter" comenzó en 2010, como un ejercicio de diseño industrial sustentable en base a un "cortador solar", desarrollado por Kayser. El mismo trató de un orbe traslúcido montado en un sistema que le permitía seguir trayectorias sobre un tablero que servía de sufridera. Allí se depositaba una lámina delgada de madera, la cual recibía los rayos concentrados del sol que refractaba el orbe, haciendo posible que su carbonización produjera el corte de la pieza.

En ese mismo año, el artista William Lamson realizó la puesta en escena "A line describing the sun", donde recorría el desierto de Mojave con un gran lente de Fresnel montado en un carrito. El lente concentraba la abrasante luz del sol en el suelo, lo cual derretía la arena para formar un trazo oscuro que rayaba el desierto.

Un año después, para su magíster en Productos de Diseño de la Royal College of Art de Londres, Kayser decidió diseñar un proceso de manufactura que atendiera las necesidades incrementales de producción de energía y escasez de materias primas. Para ello, quiso explorar el potencial de la fabricación en entornos donde la energía y el material se hallan en abundancia.

Su dispositivo movía y giraba un gran lente de Fresnel para enfocar los rayos solares a un punto focal que alcanzaba sobre los 1500°C. Con esta temperatura era capaz de derretir arena, y vitrificarla capa por capa dentro de una caja montada debajo del lente.

Mediante motores también accionados por energía solar, la caja podía moverse sobre los ejes del plano, siguiendo una trayectoria controlada por computadora hasta que una nueva capa de arena fuera vaciada encima para repetir el procedimiento.

Fig. 52-54. Evolución de dispositivos para fabricación por concentración solar. Fuente: KayserWorks.



Dos sensores de luz seguían la ruta del sol a medida que éste se desplazaba por el firmamento y todo el sistema rotaba automáticamente sobre sí mismo mediante motores que movían ruedas por un juego de rieles dobles. De esta manera, el mecanismo garantizaba que el punto focal se encontrara siempre en el centro del sistema.

Cuatro años después, y con experiencia ganada respecto a sistemas termodinámicos que permitían la deposición de material vítreo, Kayser desarrolló, junto con Neri Oxman y su equipo, el primer sistema de extrusión 3D de material de vidrio fundido para la producción de componentes ópticamente transparentes (Oxman et al., 2015). Este proyecto refleja que sus intenciones y enfoque están puesto sobre la fabricación de productos, por lo que los objetos elaborados por estos dispositivos -gafas, cuencos, lámparas- son propios de una escala media.

A través del diseño de mecanismos sencillos, Kayser habilitó un sistema de producción sustentable, para el cual, los pequeños experimentos previos probaron ser significativos en el largo plazo. De cada prueba y error, un nuevo feedback alimenta a la siguiente estrategia de intervención material, la cual incrementa hasta lograr ser extrapolable a campos prácticos y estables, como la construcción, la ingeniería o la industria (Kayser, 2012).

En una época donde las tecnologías de impresión 3D avanzan rápido hacia la escala arquitectónica, es factible asociarla con procesos de manufactura sustentables y accesibles como el "Solar sinter", sugiriendo nuevas formas de pensar y construir nuestro hábitat. Por eso mismo, Kayser se atreve a soñar con un sistema donde "múltiples lentes derriten la arena directamente sobre el suelo, pudiendo formar estructuras, como paredes [...]" (Etherington, 2011).

Fig. 55-57. Productos industriales de distintos procesos de concentración calórica. Fuente: KayserWorks; N. Oxman.



Acumulación de energía solar

La radiación electromagnética del sol puede medirse en vatios como irradiancia, o la potencia incidente en un segundo por unidad superficie, para describir su intensidad; y en julios, como irradiación, que es la suma de irradiancias por un período de tiempo, usualmente horas, que cuantifican su energía.

La superficie del sol arde a unos 6000°C, y emite $62.8 \cdot 10^9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, llegando a la atmósfera del planeta con una constante solar de $1360 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, y cuyo valor en la superficie se reduce según latitud, que determina el grosor de la capa de gases que lo filtra, así como la reflexión, difusión, etc. El desierto atacameño posee promedios anuales de $3000 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2}$ de radiación normal y $2000 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2}$ horizontal. Esto promedia $6.8 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2}$ con flujos de $1050 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ promedio (Friedman, 2017).

Chile posee grandes ventajas para el desarrollo de sistemas de energía solar: altos índices de irradiación, recursos de combustible fósil escasos y una economía con números estables (Schneider et al., 2014). A pesar de ello, y de que se ha calculado un potencial de generación solar de más de 1300 GW, nuestro país cuenta solamente con 2380 MW de capacidad instalada, o sea, un 0.18%.

Cualquier cuerpo expuesto a la energía radiante del sol sufrirá una transferencia, por convección y radiación, de energía potencial interna, o calor, que aumentará su temperatura, produciendo expansión térmica (Elert, 1998). Un sistema solar térmico es aquel que transforma la energía radiante solar en energía térmica, para acumularla, ya sea mediante calor sensible o latente, en otro medio.

Calor sensible es la transferencia térmica que resulta en el cambio de temperatura de un cuerpo sin alterarlo, y se expresa como:

$$Q_s = \Delta H = m \cdot C_p \cdot (t_2 - t_1) \quad (1)$$

El calor latente es la liberación o absorción de energía térmica que lleva a un cuerpo a reordenar su estructura molecular, sin que cambie su temperatura, y se expresa como:

$$Q_l = m \cdot L \quad (2)$$

En cifras aproximadas, la densidad del relave es $1.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, su capacidad calorífica específica, $810 \text{ J} \cdot [\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}]^{-1}$, y el calor latente específico de fusión de la sílice, $50.55 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, que dividido por su masa molar, $0.06 \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$, dan $842 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$. Sin contar pérdidas, a temperatura constante, un centímetro cúbico de relave requiere de 1.29 J para subir un grado Celsius (1), y de 1.34 kJ para cambiar de fase (2).

Refracción por lente de Fresnel

La refracción es el cambio de dirección de una onda que pasa de un medio a otro. Para determinarla se requiere comparar el cambio de velocidad de la onda, así como el cambio de dirección de propagación. La refracción de la luz usa la ley de Snell, que determina que, para un par de medios, la razón de los senos de los ángulos de los rayos de incidencia y refracción es igual a la razón entre sus velocidades de fase en ambos medios, o a sus índices de refracción. Se expresa como:

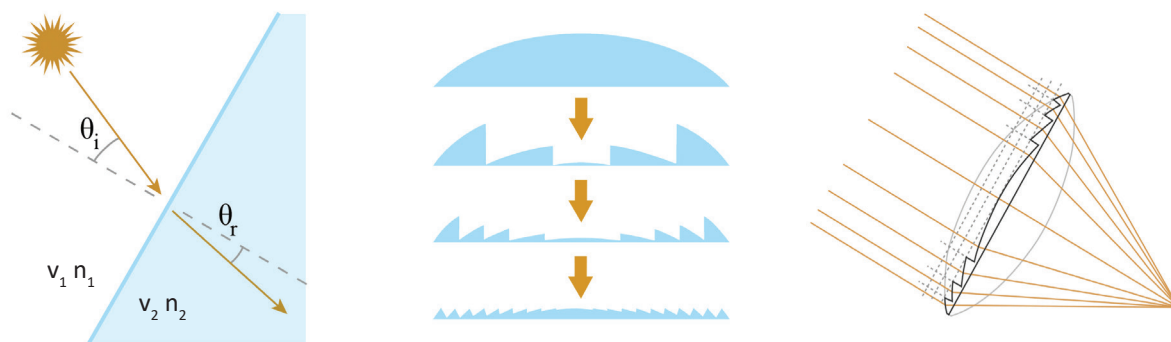
$$\frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{n_1}{n_2} \quad (3)$$

Los prismas ópticos y lentes usan el fenómeno de la refracción para cambiar la dirección de la luz. Ambos pueden enfocarla o dispersarla, siendo el lente el único capaz de formar una imagen. Los lentes convexos convergen la luz en un punto focal, mientras los cóncavos la divergen.

Los lentes de Fresnel son dispositivos ópticos de tipo compuesto compacto con gran apertura y corta distancia focal. Fueron creados para aumentar la eficiencia lumínica de faros costeros, colimando sus rayos en líneas paralelas. Por simple principio de reversibilidad fueron usados para coleccionar la luz solar, prácticamente paralela. Al empezar a fabricarse en plástico, es incorporado a las tecnologías de energía solar fotovoltaica, así como en diversas técnicas de imagen, iluminación y proyección.

Cuando sus secciones escalonadas son planas, producen una imagen poco nítida, generándose réplicas desfasadas (ghosting). Su eficiencia de transmisión varía en relación a su número F y pitch (Davis & Kühnlenz, 2007). Se fabrican mediante sustracción o por moldeo (Davis et al., 2001). Son ideales para la concentración solar (Leutz & Suzuki, 2001), encontrándose en múltiples formatos según su uso (NTKJ, 2019).

Fig. 58-60. Refracción de luz solar en dos medios (3); transición conceptual de lente plano-convexo a lente de Fresnel. Elaboración propia.



1. Sistema óptico-térmico

El primer sistema tiene como objetivo fijar el punto focal del lente de Fresnel, mientras sigue el recorrido del sol. Para lograrlo, debe considerar:

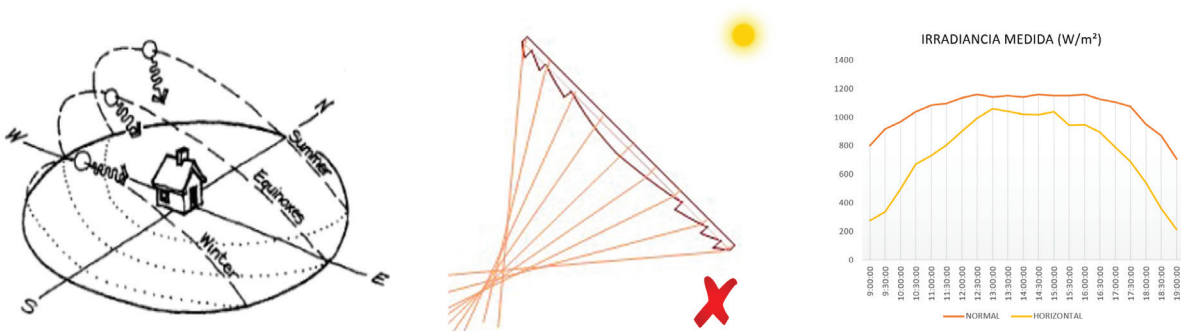
- Seguimiento de la trayectoria solar mediante reconocimiento y orientación con respecto a ángulos de acimut y de elevación solar.
- Posición correcta del lente de Fresnel, según su diámetro y distancia focal.
- Medición de irradiancia solar normal para determinación de entrada de energía.

Un mecanismo adaptable debe construirse para realizar el seguimiento solar. El mismo no puede automatizarse debido a la complejidad y costos asociados. Su diseño debe considerar, al menos:

- Bastidor o montura para el lente de Fresnel.
- Soportes tipo codo para permitir orientar y fijar el lente a una altitud solar dada.
- Apoyo horizontal al suelo capaz de girar sobre sí mismo, sobre rodamientos, soportando el peso de los codos y el Fresnel.
- Ser modular y desarmable para poder usarlo en terreno.

Se propone, entonces, un sistema de montura tipo heliostato, con libertades de giro en su plano paralelo al suelo y en otro plano que corta al primero perpendicularmente. La principal desventaja de este sistema es el ángulo oblicuo con el cual la luz incide siempre en la cama de áridos. Esto produce áreas de concentración distintas, lo que se suma al flujo inconstante de radiación electromagnética del sol.

Fig. 61-63. Estereografía del ciclo solar; posición incorrecta del Fresnel; irradiancia normal y horizontal medida en Santiago. Fuente: E. Allen - elaboración propia.



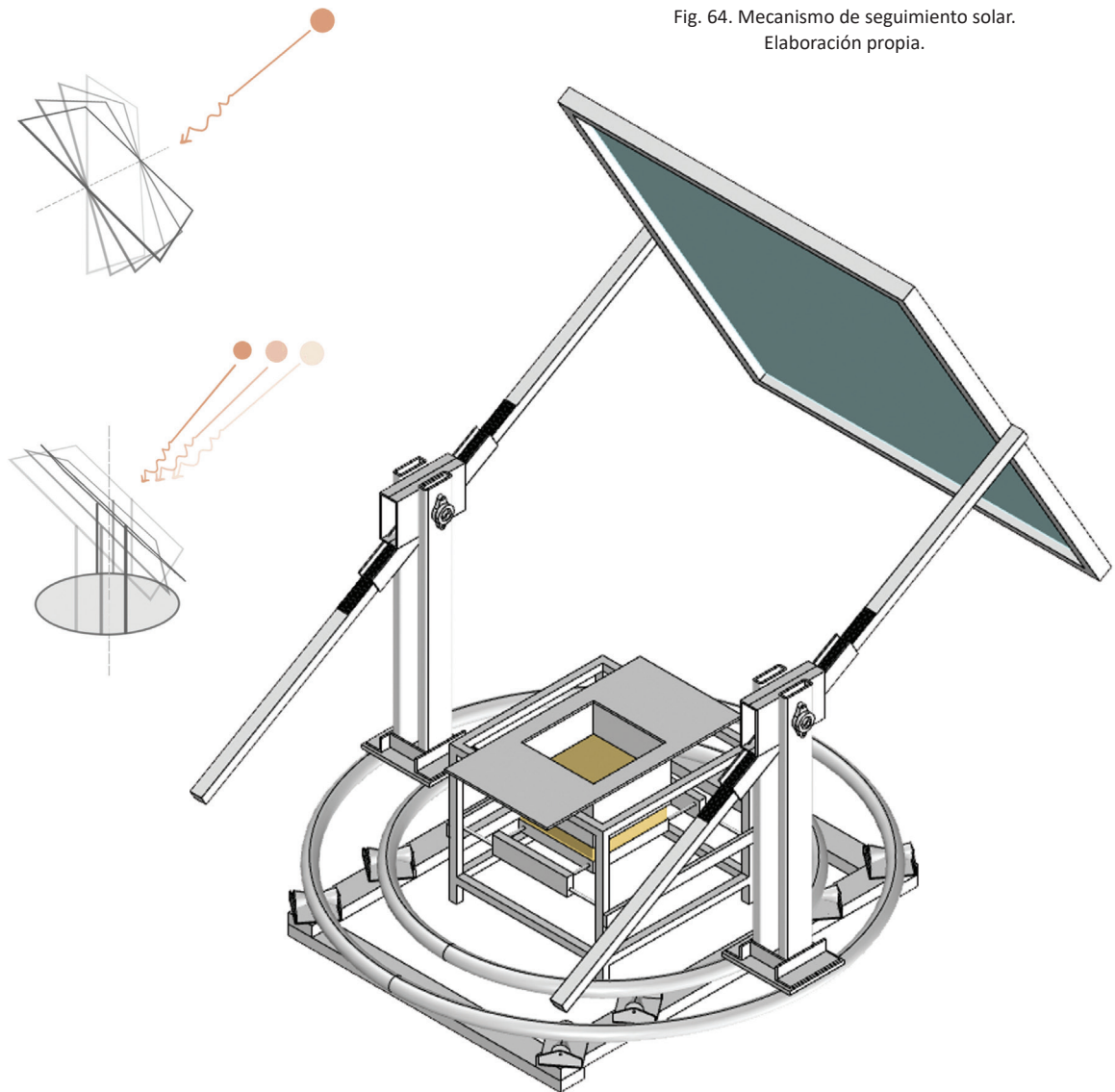
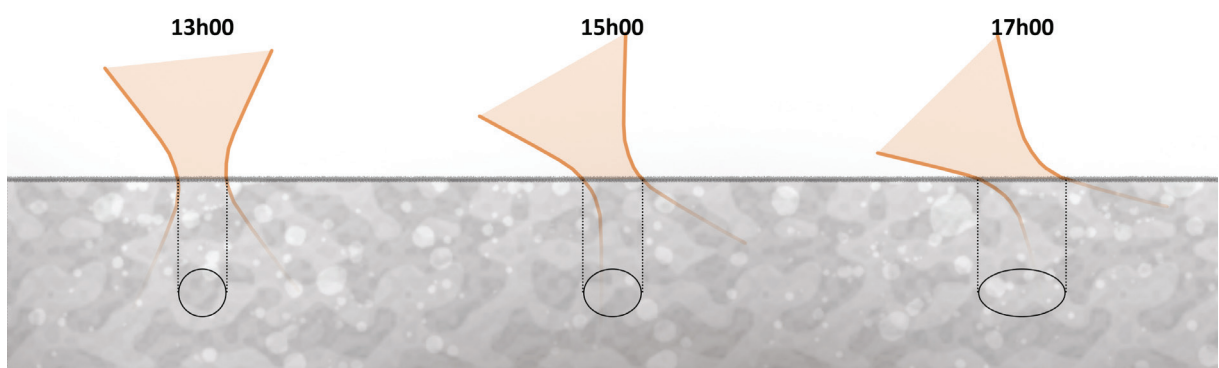


Fig. 64. Mecanismo de seguimiento solar.
Elaboración propia.

Fig. 65. Cortes en superficie horizontal de punto focal de sistema concentrador por Fresnel. Elaboración propia.



2. Sistema meca-trónico

El segundo componente del sistema Kayser es la cama de áridos motorizada. Su objetivo es trasladarse en los ejes X e Y a una velocidad controlable para seguir trayectorias geométricas. También debe tener libertad en eje Z para mover el fondo de la cama, generando así, la impresión por capa.

Su sistema electrónico debe permitir:

- Control del mecanismo desde una computadora mediante interacción con Software dedicado, el cual debe ser programado.
- Lectura de archivos de Código-G que contengan datos de localización de puntos discontinuos de una geometría dada, y de RPM para velocidad de los motores.

Una estructura compleja con componentes electrónicos y mecánicos debe construirse. La misma estará automatizada, permitiendo medir el tiempo de exposición de una muestra de árido. Su diseño debe considerar, al menos:

- Estructura mayor que soporte sus componentes y que se adapte al mecanismo de seguimiento solar.
- Componentes de movimiento que se conformen de ejes pasadores y correas de tracción para ejes X e Y, y de hilos metálicos enroscados par eje Z.
- Caja metálica revestida de paño, que disminuya su roce con cubierta metálica hueca soportada por la estructura.

Una particularidad de este sistema es que invierte la imagen de la geometría cargada, como se explica en Fig. 66. Esto se debe a que en los Software de impresión 3D el objeto "crece", mientras que en este sistema baja.

Fig. 66 y 67. Software de impresión 3D con archivo cargado; G-code del archivo de impresión. Elaboración propia.

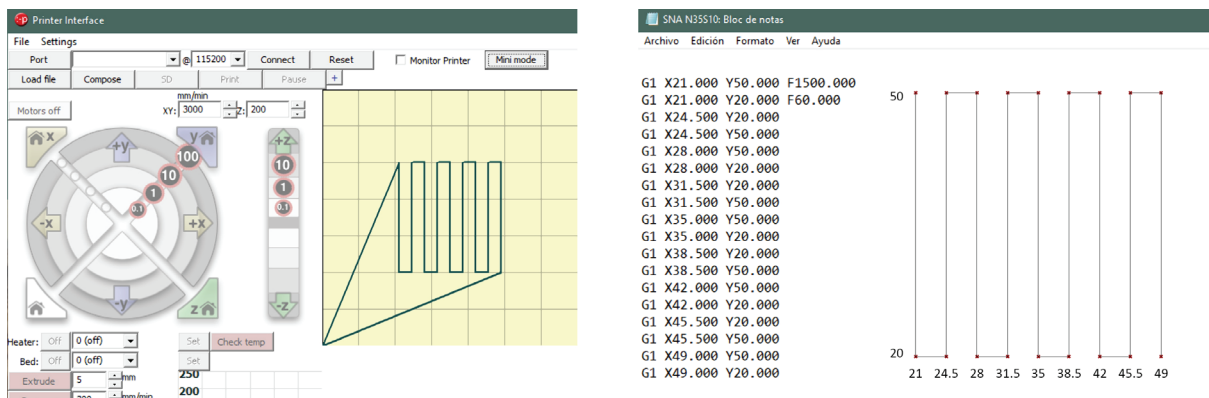


Fig. 68. Mecanismo de cama de árido.
Elaboración propia.

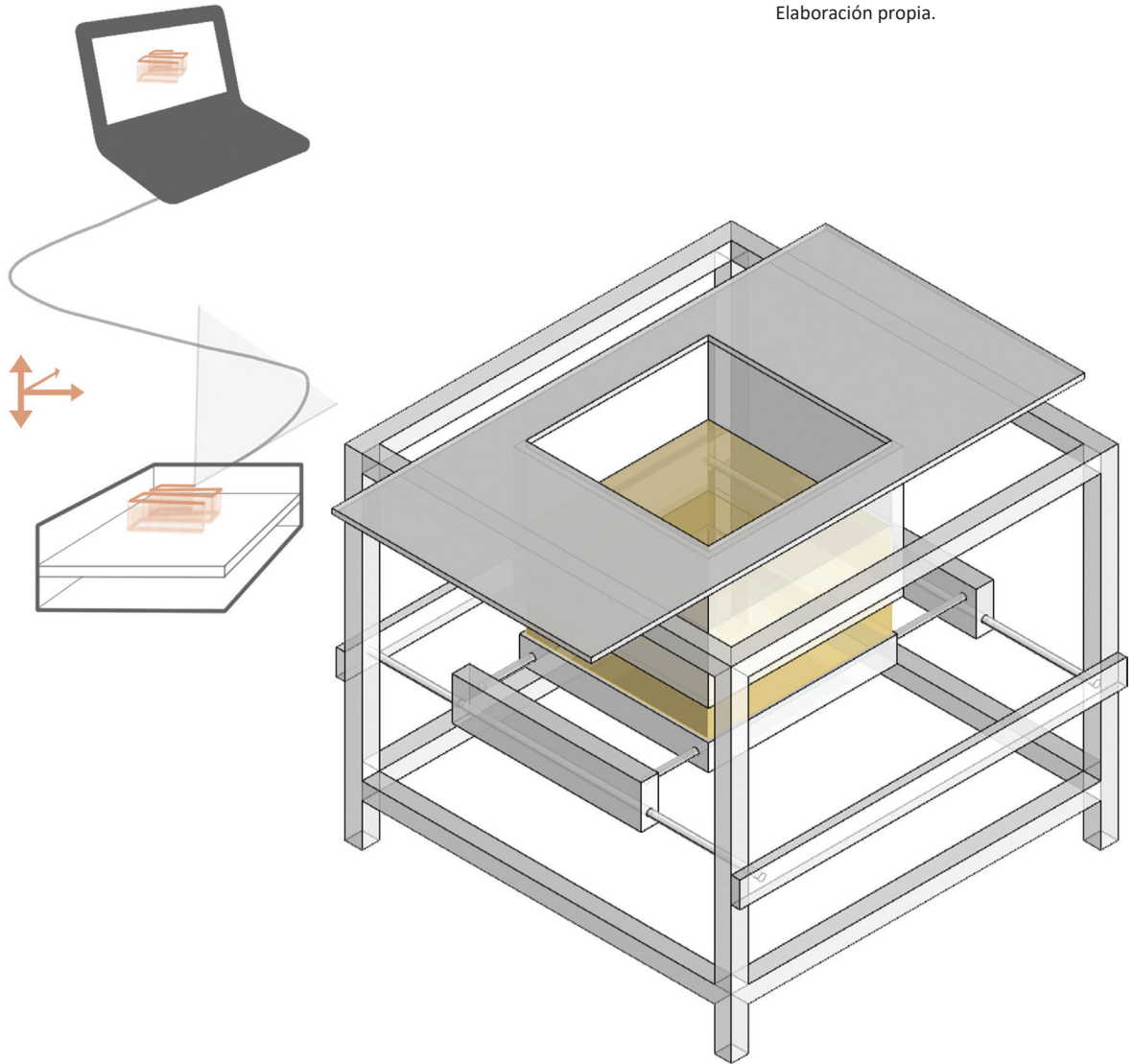
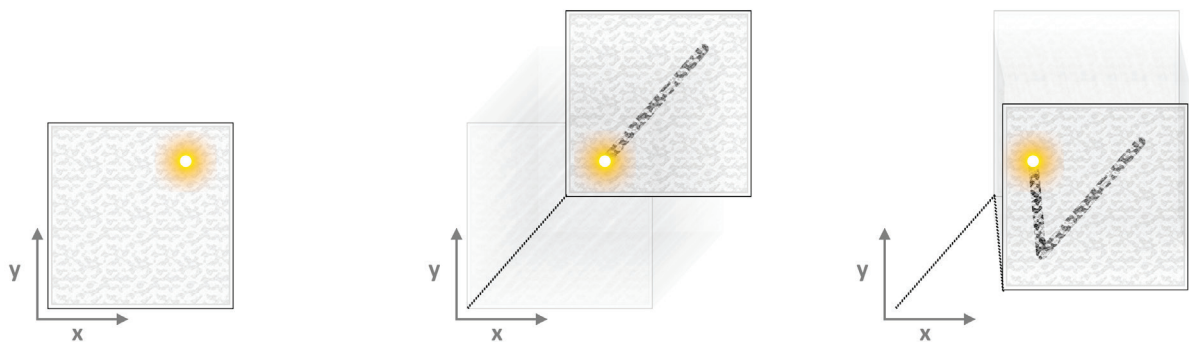


Fig. 69. Sistema de impresión por movimiento de cama de árido bajo foco de concentración solar. Elaboración propia.



2.4 Conclusiones de la revisión de literatura

En términos sucintos, se puede afirmar que:

- El sistema de "Solar sinter" aplica, de forma heterogénea, concentración de calor solar sobre una cama motorizada de árido. Su simplificación implica perder grados de automatización.
- El entorno extremo chileno del desierto de Atacama, brinda las condiciones energéticas y materiales adecuadas para desarrollar y probar un sistema de impresión solar de áridos de relave minero.
- La impresión solar de relave puede cumplir los atributos de la ecología industrial para la elaboración de material de bajo impacto ambiental, ya que usa energía renovable y material reciclado.
- El relave puede encontrarse en grandes cantidades en la zona Norte, siendo Copiapó y Andacollo los sectores urbanos más contaminados, y el primero, con más acceso al recurso solar.
- El relave no presenta índices elevados de material peligroso para la salud humana. Su contenido promedio de azufre se asemeja al del carbón doméstico. Sin embargo, al ebullición producirá SO_2 altamente tóxico.

Fig. 70. Modelo económico circular de reciclaje de relave minero y de suministro para producto de la construcción. Elaboración propia.



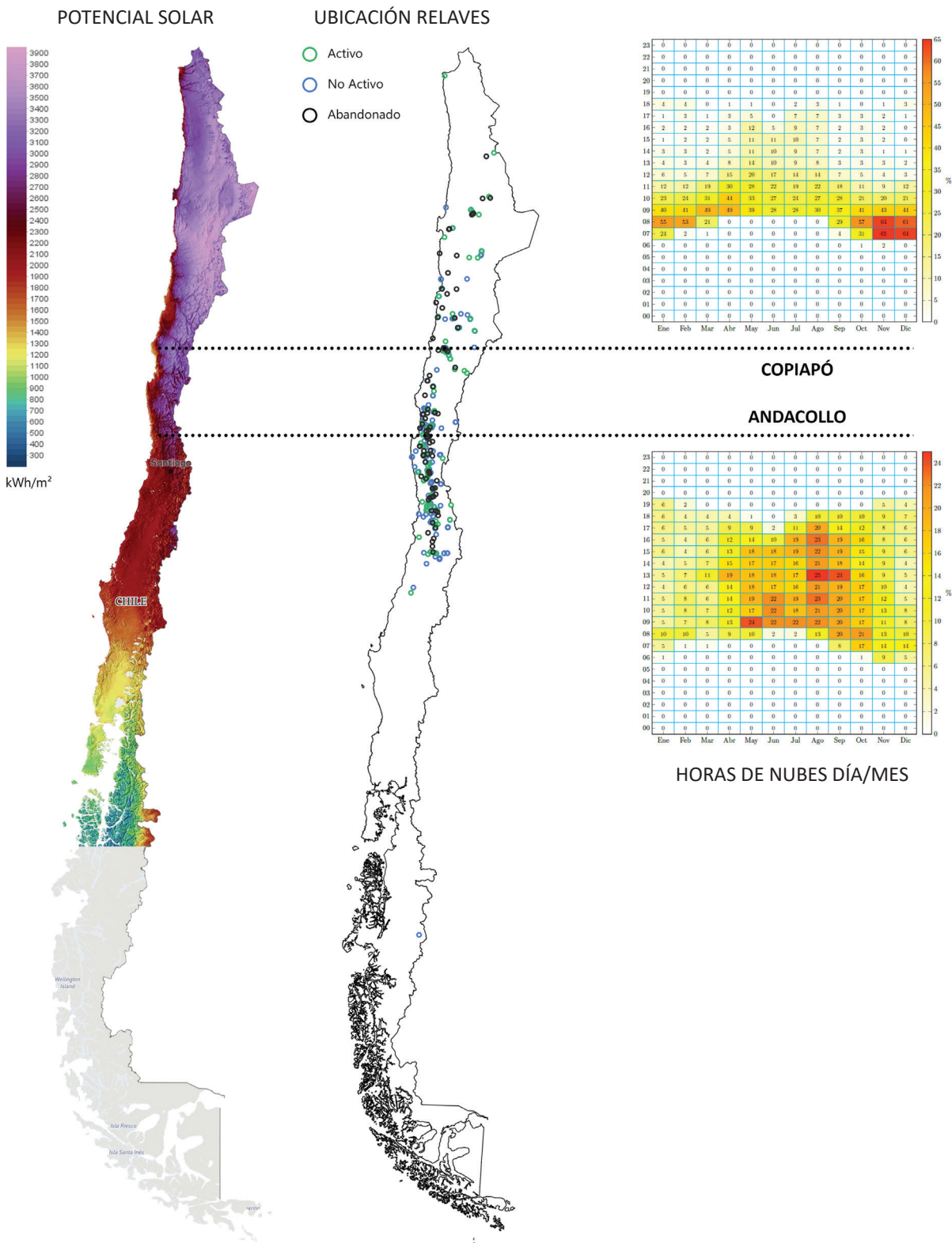
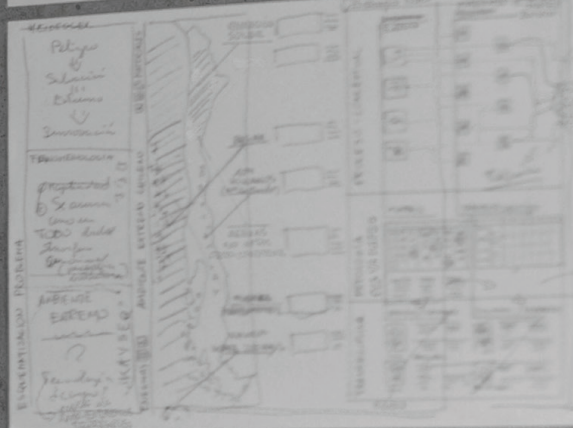
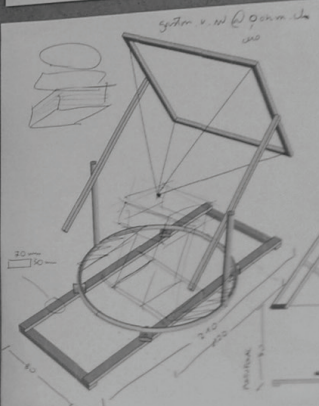
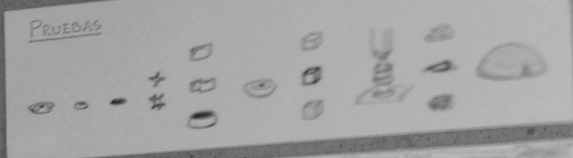
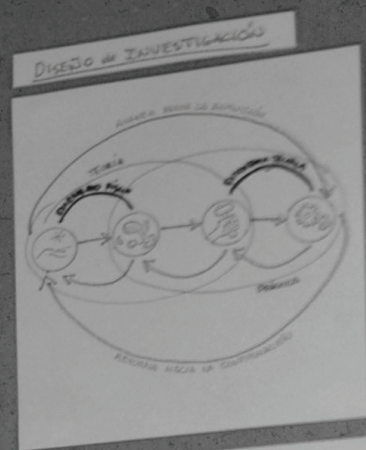
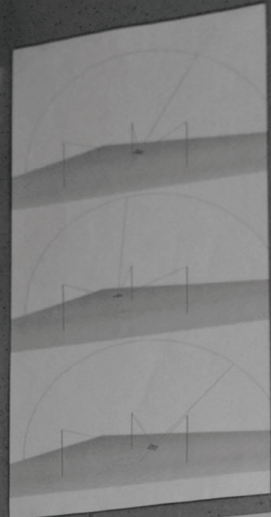


Fig. 71. Comparación de horas con nubes para elección de zona para toma de muestra. Fuente: Global Solar Atlas; Explorador solar.



Objetivo	Medio	Medida
Objetivo 1	Medio 1	Medida 1
Objetivo 2	Medio 2	Medida 2
Objetivo 3	Medio 3	Medida 3

En la ciencia, lo usual
 es lo usual, lo común,
 lo que se repite, lo que
 se repite, lo que se repite.

- 1) **MUY ABIERTO**
 - Descubrir
 - Descubrir
 - Descubrir
- 2) **PROBLEMA DEFINIDO**
 - Definir
 - Definir
 - Definir
- 3) **USAR LENGUAJE TÉCNICO**
 - Definir
 - Definir
 - Definir
- 4) **PRESENTACIÓN DE RESULTADOS**
 - Definir
 - Definir
 - Definir

CONTRASTACIÓN

PLANTILLA DE INVESTIGACIÓN

ANÁLISIS

MAYO

TO-DO

IN PROCESS

- I Documento
- Construcción
- Experimento
- Resultados
- II Lógica
- III
- IV
- V

- Substituir
- Problema
- Resultados
- Construcción

3.1 Diseño experimental

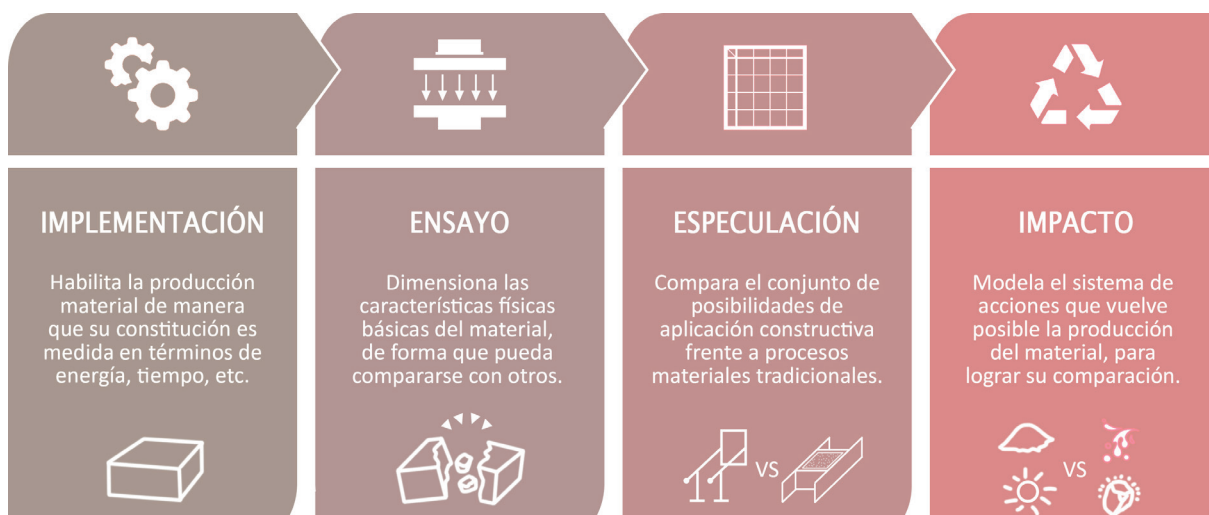
Dado que el campo de estudios que contextualiza las perspectivas de materialización con fusión solar de relave es muy limitado, por no decir nulo, esta ausencia de evidencias lleva a una investigación de orden cuantitativa y experimental.

La estrategia experimental busca comparar unidades de un sistema a partir de una situación simulada donde se modifican condiciones previas, observando de forma sistémica su efecto. Está definida por 5 características: manipulación específica de variables independientes mediante tratamiento; medición de tratamiento sobre una o más variables dependientes; asignación de unidad de estudio; uso de grupo de control y establecimiento de causalidad (Groat & Wang, 2002).

Las fortalezas de esta estrategia radican en su potencial para establecer relaciones de causa-efecto, generalizar resultados a otros fenómenos y aumentar el control sobre aspectos del diseño de investigación; por otro lado, sus desventajas son la reducción de realidades complejas en busca de causalidad, la sobre generalización que puede afectar a grupos minoritarios y la deshumanización por el énfasis en el control (Groat & Wang, 2002).

El estudio tiene 4 etapas: implementación mecánica, que permite generar probetas; el ensayo material, donde se miden las propiedades físicas básicas del material constituido; la especulación, mediante tabla comparativa, de posibles aplicaciones constructivas; y la perspectiva de su impacto ambiental, que ayuda a modelar y comparar el Ciclo de Vida del sistema de producción.

Fig. 72. Fases de investigación. Elaboración propia.



3.2.1 Técnicas de análisis

La elección de las técnicas de análisis se basó en su prestancia para dimensionar el proceso material en sus aspectos físicos, constructivos y ambientales, tomando en consideración su limitado alcance actual.

Para la fase 1 se buscó simplificar el mecanismo automatizado del proceso de Kayser, por uno más accesible, de manera que pueda constituirse un material sólido con exposición, temperatura y volumen medibles. En la fase 2 se utilizaron requisitos de diseño de material cerámico y modular, el ladrillo artesanal, para su comparación efectiva. La fase 3 comparó, mediante tabla, aplicaciones constructivas posibles según lo experimentado, en contraste con técnicas tradicionales señaladas por DITEC. En la fase 4 se aplicó un enfoque de Ciclo de Vida para modelar el sistema constructivo en sus etapas frente al sistema tradicional de ladrillos.

Cada técnica usada se enfocó en responder las preguntas planteadas al inicio de este documento, de manera jerárquica, secuencial y recursiva, como muestra la Fig. 73. En su desglose posterior puede observarse cómo son usadas para organizar y categorizar la información resultante.

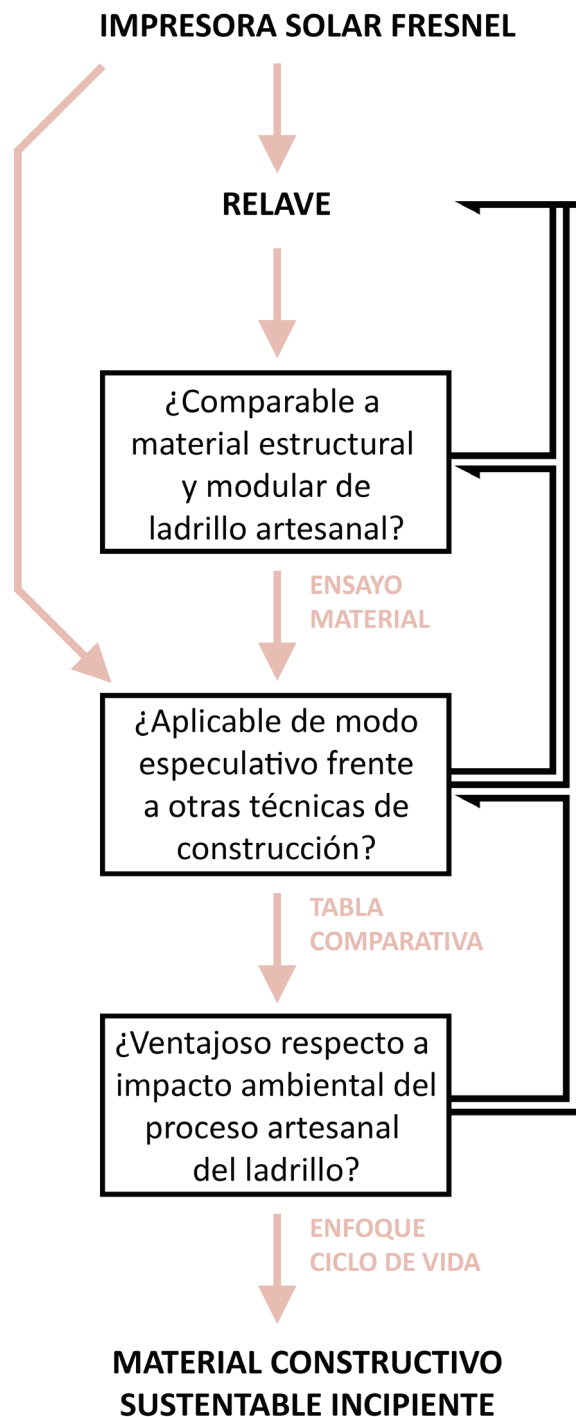


Fig. 73. Diseño de investigación. Elaboración propia.

1. Ensayo material por norma chilena

Para alcanzar el objetivo de la comparación de la dimensión física del material desarrollado, fue necesario tomar como referencia el extenso legajo de requisitos locales para el diseño de material constructivo cerámico. En ese sentido, fue revisada la normativa vigente referida a las unidades de albañilería desarrollada por el Instituto Nacional de Normalización, que contaba con 8 documentos, los cuales son:

- **NCh167.Of2001** (DS10): Construcción - Ladrillos cerámicos - Ensayos.
- **NCh168.Of2001** (DS10): Construcción - Ladrillos cerámicos - Verificación dimensional y geométrica.
- **NCh169.Of2001** (OGUC): Construcción - Ladrillos cerámicos - Clasificación y requisitos.
- **NCh741.Of1971**: Coordinación modular de la construcción - Albañilerías.
- **NCh771.Of1972**: Arquitectura y construcción - Coordinación modular - Ladrillos cerámicos - Dimensiones modulares.
- **NCh791.Of2001**: Construcción - Ladrillos cerámicos - Definiciones.

- **NCh1928.Of1993 Mod 2009** (OGUC): Albañilería armada - Requisitos de diseño y cálculo.
- **NCh2123.Of1997 Mod 2003** (DS10): Albañilería confinada - Requisitos de diseño y cálculo.

El ladrillo cerámico es un bloque de pasta de arcilla cocido por método industrial (INN, 2001), y compuesto de silicatos de alúmina hidratados, que se vuelven vítreos al cocerse a altas temperaturas. Dado que el relave está principalmente formado de aluminosilicatos y que la concentración solar los lleva a su punto de fusión, se trata de un material vítreo de tipo cerámico-amorfo.

Los ladrillos fabricados de forma elemental sin prensa pueden tener dimensiones con una relación 1 largo = 2 ancho + 1 junta (INN, 1972). Se les aplica pruebas de resistencia a la compresión (4 MPa en 20 MPa/min sobre bloque cuadrado), adherencia a cizalle y absorción de agua (hasta 22%) (INN, 2001; 2003). Las normas 168, 169, 791 y 1928 no se aplican a ladrillos artesanales.

Concordante a las limitaciones declaradas, para el ensayo de compresión y de absorción se comparó un volumen pequeño de relave fundido con uno idéntico de ladrillo fiscal. Estas dimensiones eran insuficientes para realizar pruebas de adherencia a cizalle.

2. Tabla comparativa de aplicaciones constructivas

Esta herramienta sirvió para realizar la proyección de las aplicaciones especulativas para la construcción, basadas tanto en la impresión solar de relave como en el sistema mecanizado de concentración solar por lente de Fresnel. La información levantada de las pruebas experimentales, es decir, los ensayos materiales, sirvieron como evidencia empírica para especular las aplicaciones propuestas.

La tabla de comparación se compuso de los siguientes elementos: las filas representaron las familias de materiales según su manera de ensamblarse para formar unidades más complejas, y las columnas incluyeron soluciones constructivas tipo las cuales pudieran ser mejoradas en términos de sustentabilidad con técnica de concentración solar, incorporando o no relave.

El primero aspecto para la comparación se basó en la relación de los sistemas constructivos tradicionales, aquellos regidos por normas chilenas, y normas internacionales reconocidas y utilizadas en Chile, y que no requieren de un certificado de aprobación de la DITEC para poder participar de los programas habitacionales del MINVU, como son aquellos que utilizan madera, albañilería, hormigón y

acero, con los procesos materiales que los forman. Las categorías de materiales constructivos según la manera en las cuales sus distintos componentes se arman para formar unidades mayores son:

- Laminables - se cortan - ej: madera
- Morterizables - se pegan - ej: ladrillos
- Fundibles - se fusionan - ej: metales
- Aglomerables - se curan - ej: cemento

Para la comparación se necesitó levantar una muestra de soluciones constructivas que fueran aplicadas en el país.

El MINVU incorporó modificaciones a la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones con las cuales poder establecer requisitos de acondicionamiento térmico a las viviendas, lo cual exigió la elaboración de un Manual de Aplicación de la Reglamentación Térmica (Minvu, 2006), que incluía un compendio de Soluciones Constructivas Genéricas, mismos incorporados en los Listados Oficiales de Soluciones Constructivas de la DITEC para Acondicionamiento Térmico, Aislamiento Acústico y Resistencia al Fuego, los cuales se encuentran en el Anexo B:

- Techumbres, con cercha, viga y losa.
- Muros, hormigón, albañilería, especial.
- Pisos, con entramados y losa.
- Ventanas vidriadas.

3. Enfoque de Ciclo de Vida por norma ISO

Si bien la declaración ambiental de producto con sostenibilidad en la construcción se presenta como un método bien establecido de medición de impacto ambiental del análisis de Ciclo de Vida (ISO, 2010), con softwares accesibles como SimaPro y con una aplicación que está aumentando en el sector de la construcción, esta herramienta cuantitativa se hubiera limitado a la etapa de producción, debido al nivel incipiente del proceso. Por otro lado, el enfoque o perspectiva de Ciclo de Vida faculta formas de entender el impacto del conjunto de acciones contenidas en las etapas de implementación de un producto. De esta manera, ayuda a modelar el gran sistema de actos detrás del mismo, identificando tanto las oportunidades como los riesgos de esta tecnología de producción emergente.

Mientras un ACV habitualmente calcula la huella ambiental que generan productos o servicios, en un enfoque CV, incluido en ISO 14001:2015, gana protagonismo la gestión ambiental que el productor pueda incluir en su cartera de productos. De esta forma, permite identificar aspectos ambientales más significativos y estimar las consecuencias ambientales desde nuevas perspectivas para el sector productivo.

La norma antes descrita indica en su Anexo que no es necesario realizar un ACV para determinar aspectos ambientales, siendo “suficiente pensar cuidadosamente en las etapas del ciclo de vida que la organización puede controlar o influenciar” (ISO, 2015). Busca: (1) determinar aspectos ambientales, (2) controlar actividades que puedan influir, (3) conocer impactos ambientales asociados y (4) tener en cuenta el Ciclo de Vida.

Para ello, la norma ISO 14004: 2016 presenta una guía práctica para aplicar la perspectiva CV, que considera lo siguiente:

- Etapas en el ciclo de vida del producto.
- Grado de control e influencia sobre etapas del CV.
- Vida útil del producto.
- Influencia en cadena y longitud de la cadena de suministro.
- Complejidad tecnológica del producto.

Por ende, se estableció, de la forma más precisa, las partidas o módulos de cada etapa del actual proceso material, presentando las principales características que lo engloban de manera gráfica, para dinamizar su contrastación con el proceso artesanal de fabricación de ladrillo cerámico.



4.1 Tratamiento de impresión solar

Como se explicó, la fusión controlada del árido de relave requirió de un mecanismo homólogo a la máquina de Kayser, aunque sin piezas automatizadas. Su construcción fue imprescindible para el establecimiento del tratamiento, el cual sirve de plataforma inicial para responder los cuestionamientos levantados en el problema de investigación.

El diseño partió de la base de que ciertos mecanismos del sistema no requerían de su automatización para que funcionara. Estos son: el **disco** acimutal, que se gira manualmente, y los **codos** de apoyo, que se traban pasando una pieza metálica entre 91 perforaciones compartidas, mismas que representaron la libertad de elevación del sol de 0 a 90° (Anexo A).

El lente de Fresnel usado se compró en 2017 a Dan Rojas, dueño del portal GreenPowerScience, especializado en venta de colectores solares. El lente no contaba con valores #F, de pitch, ni de eficiencia de transmisión, sólo dimensionales. Esto se debe a que Rojas los consigue desarmando televisores de proyección viejos. Su material es PMMA, tiene formato rectangular y posee muchas abolladuras que afectan el paso de luz. Se consultó el precio del Fresnel CF800-BXL a la empresa japonesa NTKJ, costando 921 USD, con 302 USD en envío.

Por otro lado, se realizó un viaje de reconocimiento al sector escogido en Copiapó para la prueba en terreno, de manera que se pudieran extraer las muestras que serían usadas en Santiago. Para escoger el sitio, se consideraron dos factores: cercanía al sector céntrico, donde está la terminal, pensando en el traslado de las piezas de la máquina por 2 personas sin vehículo, así como a su registro en los datos geoquímicos de Sernageomin. Estas condiciones las cumplía el depósito mayor de CMC Sali Hochschild, con 3'202,671 m³ de relave, cuyas propiedades están detalladas.

Con el dispositivo en funcionamiento, el tratamiento fue factible de aplicar, siendo sus parámetros de setting las variables independientes: exposición al calor solar, o la velocidad de impresión, controlable, como producto de una irradiancia que no es controlada sino sólo mantenida; y la altura de capa, que sirvió para aproximar el volumen de impresión. De esa manera, fue posible estimar el tiempo de impresión que le tomaría al sistema actual fusionar volúmenes más grandes, en este momento inalcanzables, así como a proyectar el deseable vaciado del depósito.

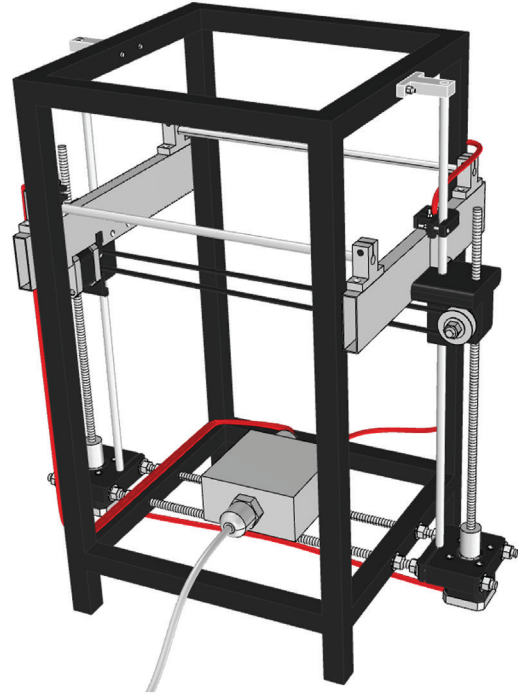
A continuación, se muestra el diseño, el armado, los componentes y los costos del mecanismo simplificado de impresión solar de áridos de relave:

Fig. 74-81. Despiece de mecanismos de cama de árido y de seguimiento solar Fresnel. Elaboración propia.

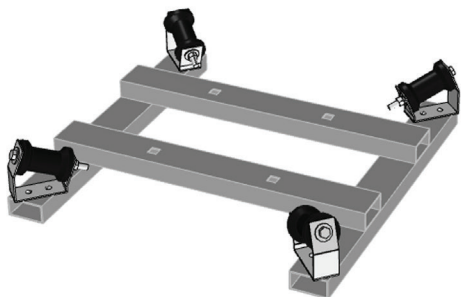
ESTRUCTURA



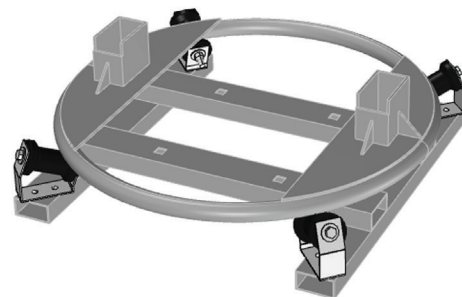
EJE Z CON HILOS



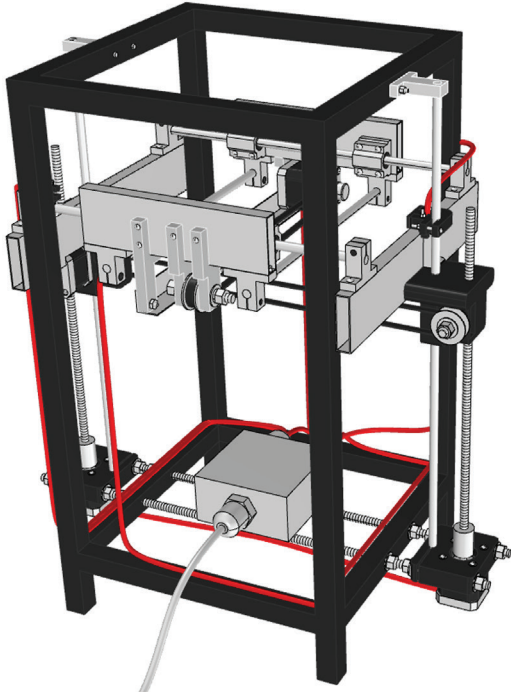
BASE CON RODILLOS



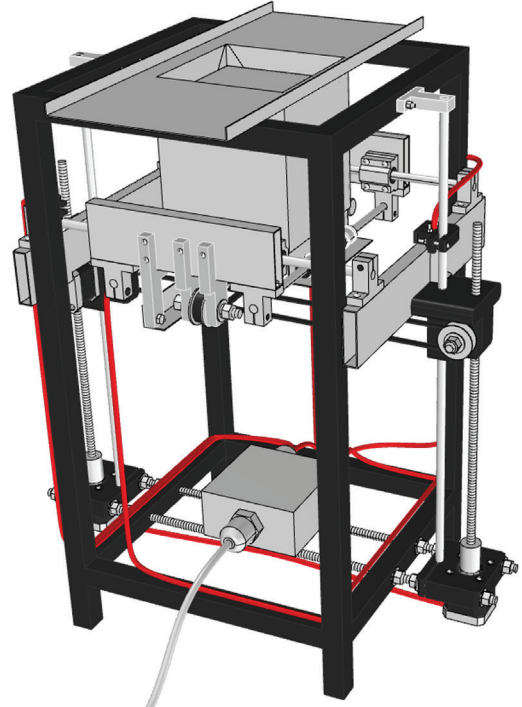
DISCO ACIMUTAL



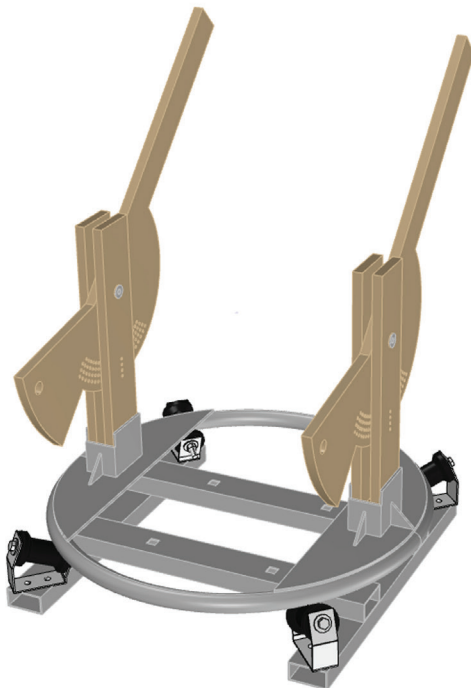
EJES X E Y



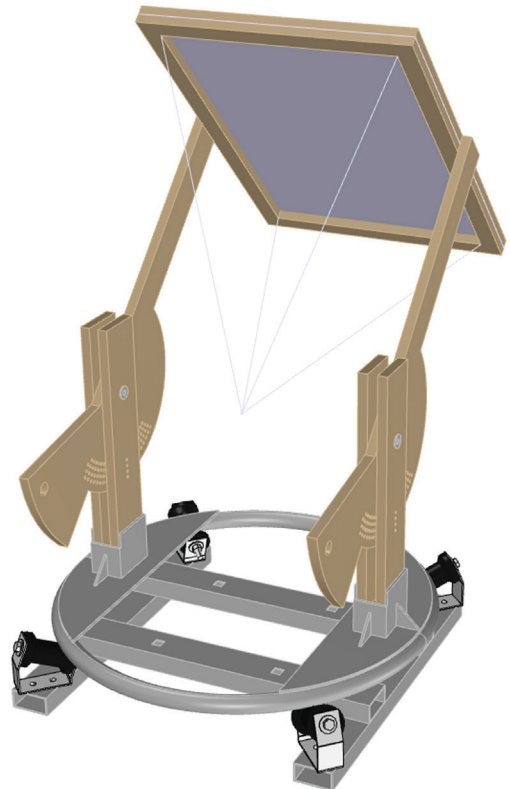
CUBIERTA + CAJA



CODOS PERFORADOS



LENTE DE FRESNEL



El costo de la máquina se elevó de forma determinante gracias a la inclusión de una impresora 3D por parte de desarrolladores tecnológicos para la primera implementación mecánica. El motivo, en realidad, tuvo relación con el sistema de circuitos integrados del dispositivo electrónico, ya que requería de una programación dilatada si se comenzaba desde cero, mientras que la impresora Prusa

sólo debía ser adaptada. Esto significa que el costo se reduciría al operar con sistemas armados por uno mismo, para lo que se requiere bastante experiencia. El sistema Fresnel es, en realidad, bastante accesible, ya que el elemento óptico puede ser adquirido a precios muy bajos en los países donde se producen. Lamentablemente, en Chile no existen proveedores dedicados sino esporádicos, por lo que debe importarse.

Fig. 82. Lista de componentes principales de la impresora solar, con su precio y proveedor respectivo. Elaboración propia.

ARTÍCULO	PRECIO	PROVEEDOR
1 Lente de Fresnel 29"x20"	\$ 92.703	Dan Rojas
Shipping	\$ 86.237	
2 Impresora 3D Prusa Control Tria Axial	\$ 699.963	TechDev
3 Tablero control	\$ 188.124	TechDev
4 Trabajo en fierro	\$ 59.440	AceroPerfil
5 Cubierta - Corte y doblado	\$ 33.427	Lemaco
6 MDF 244x152x2	\$ 26.550	Masisa
Fresado en FAU	\$ -	
7 Pernos, tornillo y golillas	\$ 20.772	Varios
8 Rodillos náuticos 4" x 4 un.	\$ 17.196	TecnoMar
9 Rodamientos P2B1 1" x 12 un.	\$ 12.000	RodaMundo
10 Aluminio AA 1100 H14 Liso	\$ 13.771	MaquiMetal
11 Esmalte y Antióxido	\$ 12.552	Sodimac
12 Eje acero inoxidable 12x1000	\$ 9.500	Kamees Ltda.
13 Marco Cuadro Fresnel	\$ 5.000	Taller "Al Óleo"
TOTAL		\$ 1.277.235

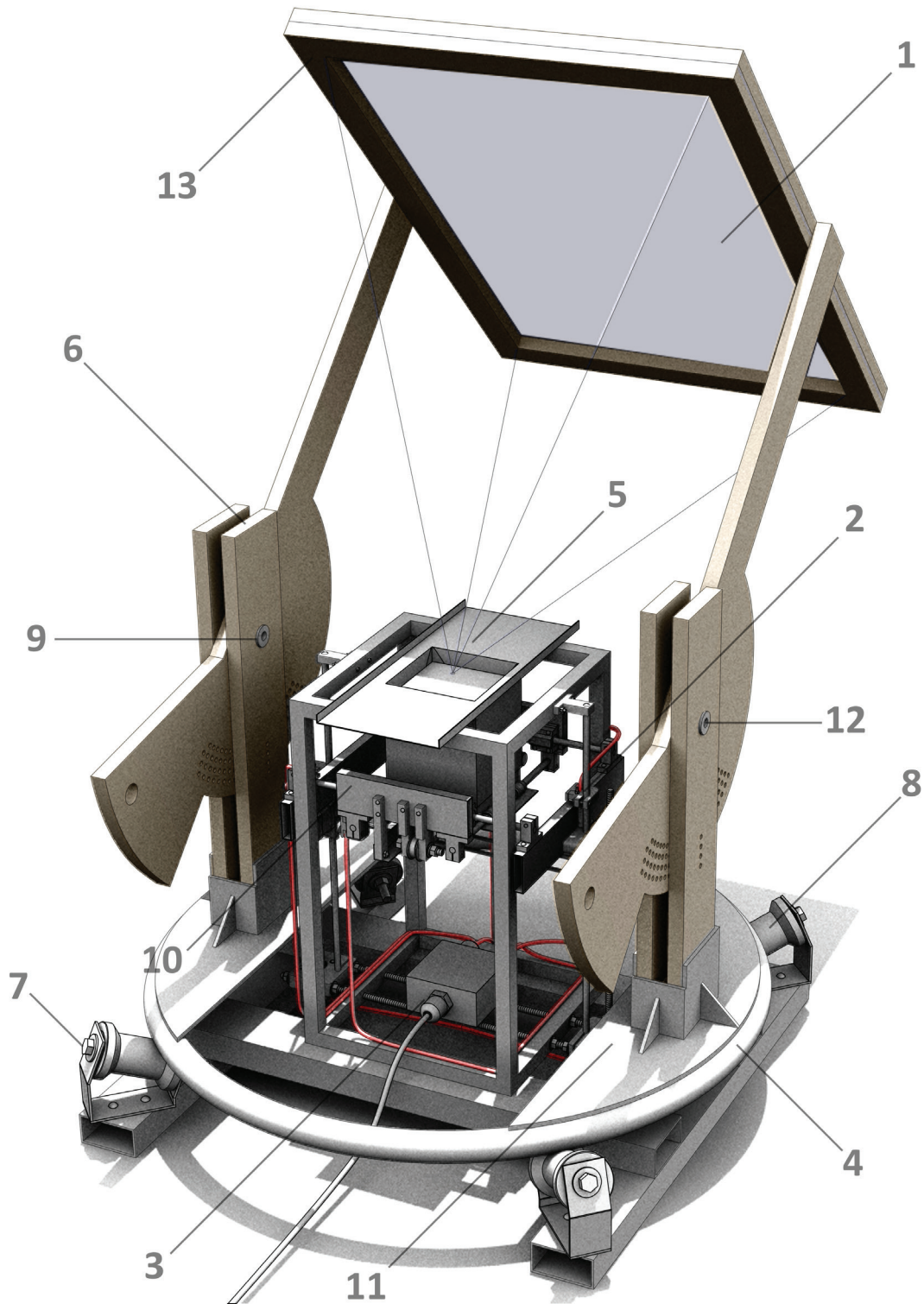


Fig. 83. Modelo de impresora solar de áridos desarrollada para esta investigación. Elaboración propia.

Fig. 84-87. Procesos de mecanizado para elaborar los componentes del mecanismo, en Taller Mecánicos, U. de Chile. Elaboración propia.



Fig. 88-91. Distintos momentos del proceso de construcción de la impresora solar. Elaboración propia.

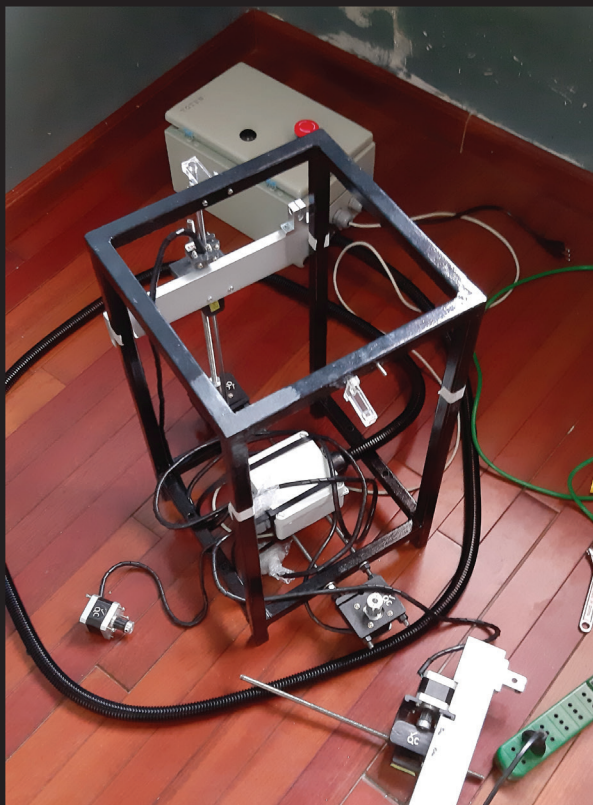


Fig. 92-94. Pruebas de trayectoria usando plumones. Elaboración propia.

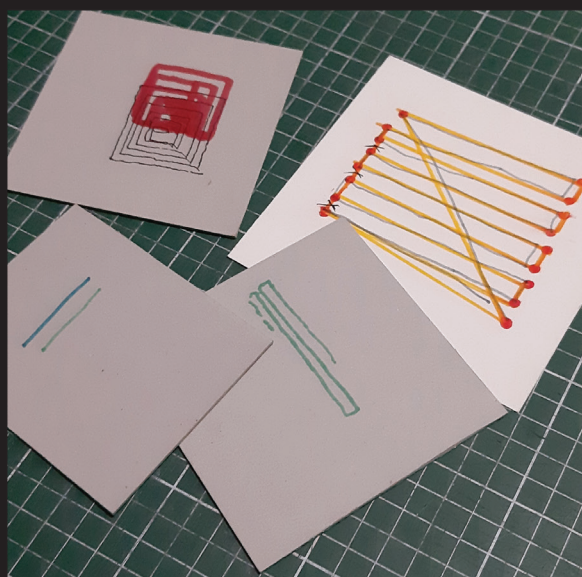
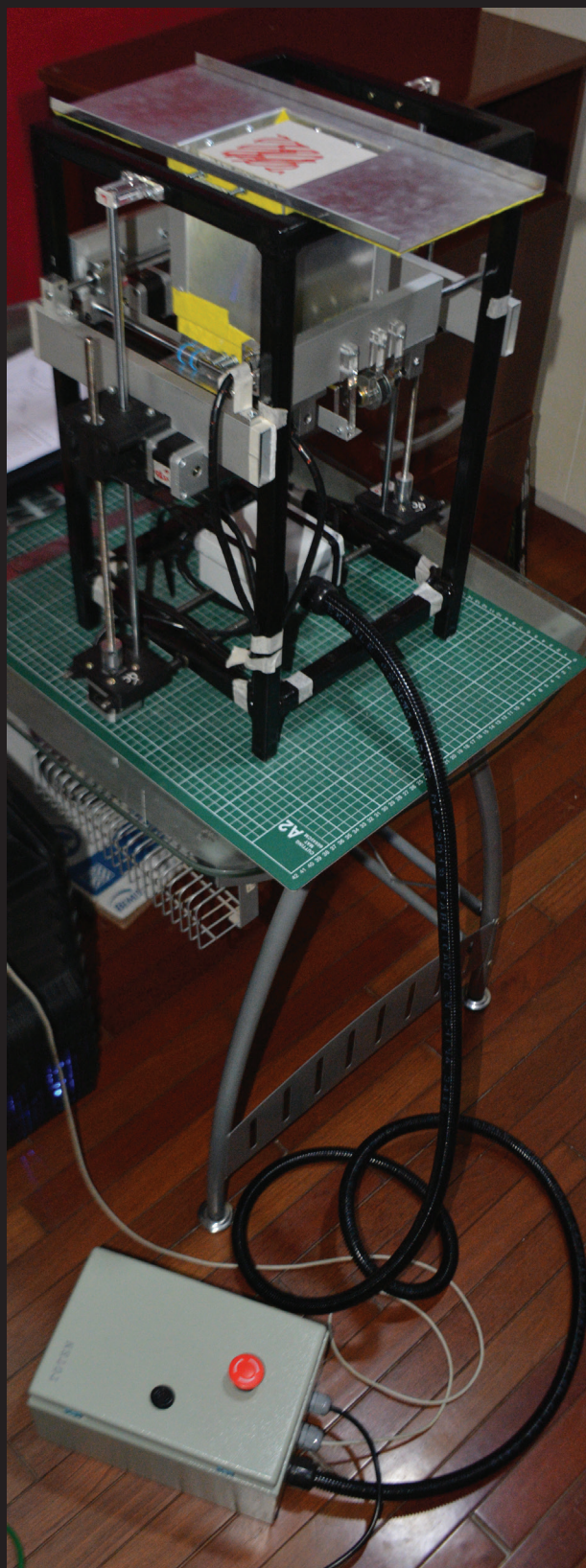
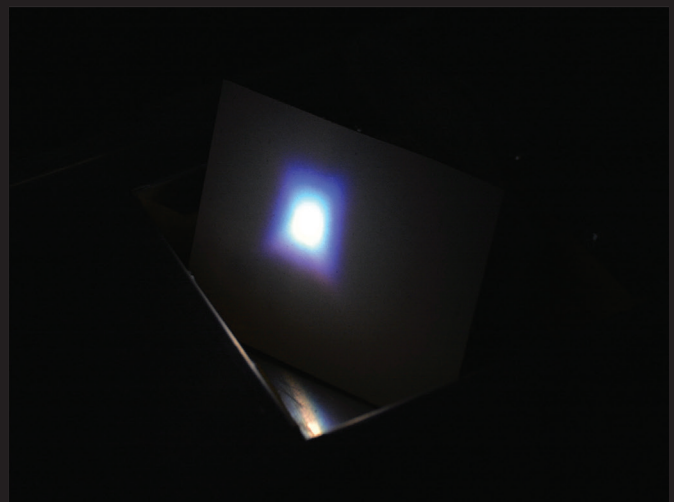
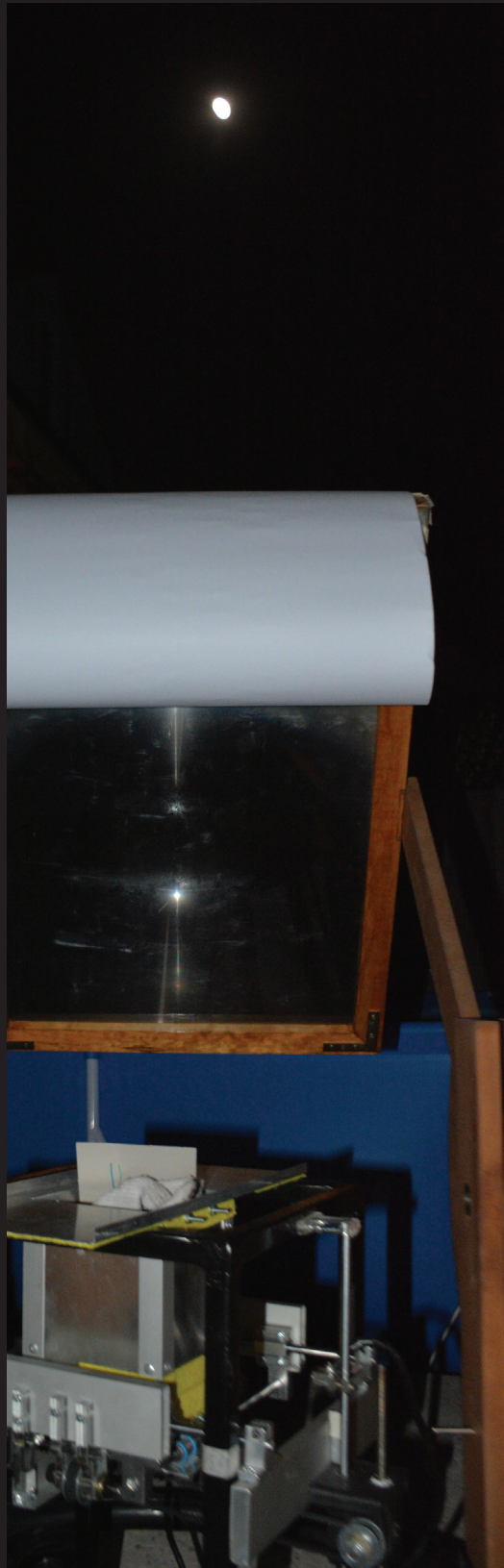


Fig. 95-97. Medición de la distancia y diámetro focal aprovechando luz paralela de la Luna. Elaboración propia.



4.1.1 Parámetros

Corresponden a las variables independientes del tratamiento, que son manipuladas deliberadamente para alcanzar los objetivos de comparación.

Como se mencionó, los parámetros del sistema son: la energía calórica que produce transformación según su acumulación en un período de tiempo, o sea, por exposición; y el volumen de material transformado, el cual es calculado multiplicando la superficie del material por la altura de capa o step. Un parámetro secundario es el diámetro de nozzle, que es la distancia que separa las trayectorias del path de la impresión. Estos datos son relevantes no solamente para tener un registro metódico de las observaciones por el experimento levantadas, sino porque habilitan la posibilidad de proyectar el crecimiento del material a escalas en las que aún no es posible acceder.

Usando dispositivos precisos de medición, en lugar de aplicar fórmulas de estimación, se calculó la energía estimada que pasa por el área del Fresnel, que es de 3632 cm^2 , o 0.3632 m^2 . Como la aplicación de energía es heterogénea sobre la superficie que contiene al árido, se declara la dificultad de establecer una medición ideal.

Se usó un medidor de energía solar ISM 410 de Iso-Tech, para determinar el flujo de radiación, con unidades en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$. En las pruebas correspondientes, estos datos se multiplicaron por el tiempo, en segundos, de duración de la impresión, registrado por el software. Se observó la temperatura una vez por impresión con un termómetro infrarrojo HoldPeak 1500°C . La cama de áridos posee tolerancias de décimas de milímetro, por lo que la medición del volumen del árido dispuesto en el contenedor para su fusión es muy preciso.

Fig. 98-100. Medición de irradiancia solar, temperatura en punto focal y densidad de relave. Elaboración propia.



4.1.2 Probetas

Para realizar pruebas que establezcan diferencias respecto a un mismo tratamiento, un conjunto de probetas debe realizarse, de manera que se propicie un control. Se optó por realizar pruebas preliminares con áridos comunes de arena de playa, para observar diferencias inmediatas respecto al árido de relave.

La arena se fundió generando formas de gotas lisas de vidrio café. El relave, por su parte, adquirió formas opacas, rugosas y hasta retorcidas, con consistencia escasa y coloración cobriza, despidiendo olores penetrantes que hicieron necesario usar mascarilla con filtros de material particulado. Se consideró que el material era inestable debido a su composición muy variada. Sin embargo, un número mayor de pruebas rápidas mostró que su tendencia a tomar este tipo de formas disminuye en relación directa con su granulometría.

El relave obtenido en Copiapó poseía una cantidad de elementos gruesos que dificultaban el cambio de fase. Por tanto, una etapa de filtrado fue requerida para impedir que agentes con granulometrías demasiado diferentes, afecten la transferencia de energía al volumen. En Dpto. de Sedimentología de FCFM, se realizaron pruebas de tamizaje usando la norma ASTM de clasificación de áridos. La medición granulométrica de 2108.8 g de relave reportó:

- retiene malla n°10, 5.6 g o el **0.26%**.
- pasa n°10 y retiene n°60, 937.2 g o **44%**.
- pasa n°60 y retiene n°270, 1128 g o **53%**.
- pasa por malla n°270, 38 g o **1,8%**.

Para las probetas detalladas a continuación se utilizó una malla del N°60, que es la malla de corte para las arenas finas según ASTM. Esto supuso perder cerca del 45% de la masa del árido, pero mejorando el comportamiento térmico.

Fig. 101-102. Pruebas preliminares en arena de playa y en relave, demostraron necesidad de tamizaje. Elaboración propia.



1. En laboratorio

PROBETA 1 (10-02-2020)

; layer_height = 5 mm

; nozzle_diameter = 5 mm

; perimeter_speed = 1 mm/s

Irradiancia promedio = $1148 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$

Temperatura = 1226°C

Tiempo por capa = 12'00"

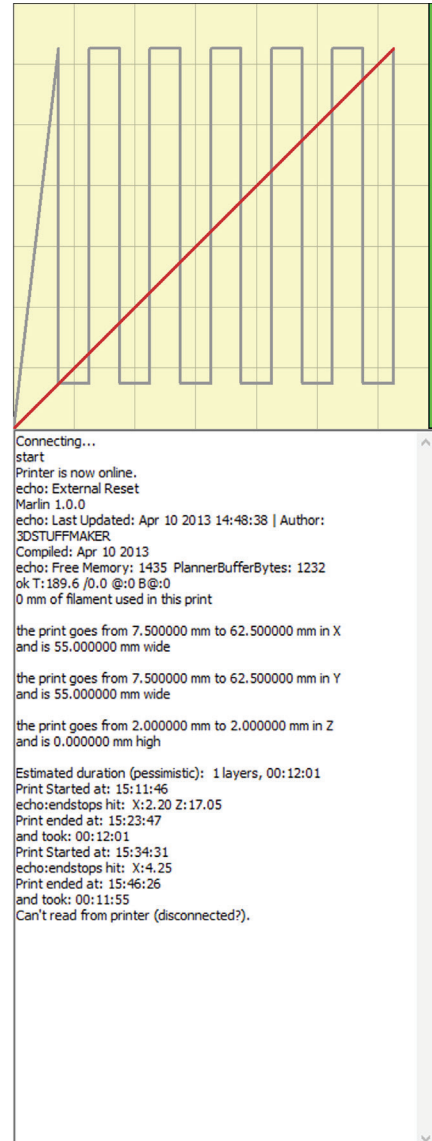
Tiempo total = 24'00"

La primera prueba tuvo 2 capas o steps. Se esperó lograr 1 centímetro de altura.

La probeta se desmoronó sin resistencia alguna.

El relave se transformó en unos pellets, algunos muy resistentes al tacto y otros frágiles y huecos.

No fue posible establecer relación entre exposición y volumen en estas condiciones.



PROBETA 2 (11-02-2020)

; layer_height = 5 mm
; nozzle_diameter = 5 mm
; perimeter_speed = 2 mm/s

Irradiancia promedio = $1138 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

Temperatura = 1248°C

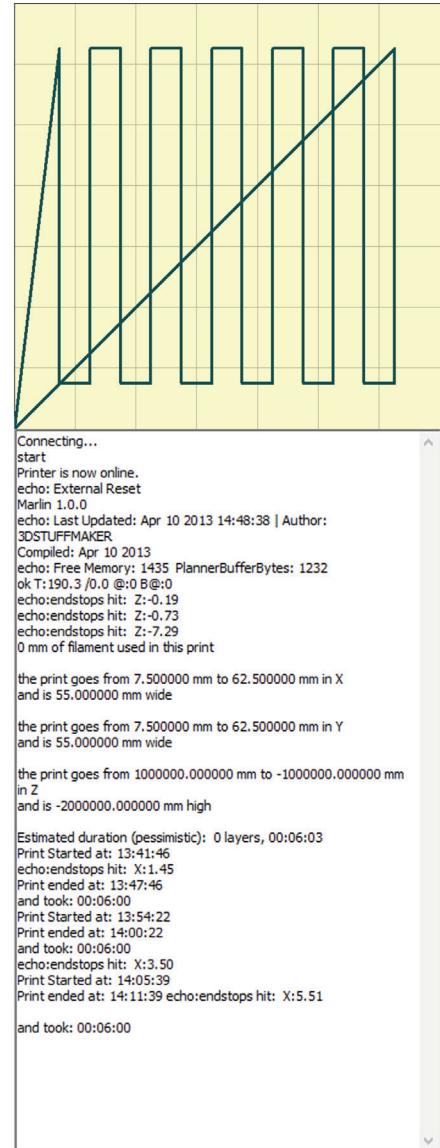
Tiempo por capa = 6'00"

Tiempo total = 18'00"

Repitió path de prueba anterior a velocidad mayor, en 3 capas. Se pretendió que la altura de capa fuera 2 mm, pero el material se abombaba de manera desigual hasta los 5 mm.

La probeta se desmoronó sin resistencia alguna.

En una prueba más, se comprobó excentricidad del punto focal del sistema, ya que con geometría oblicua se imprimió una figura regular.



PROBETA 3 (13-02-2020)

; layer_height = 3 mm
; nozzle_diameter = 3 mm
; perimeter_speed = 16 mm/s

Irradiancia promedio = $1158 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$

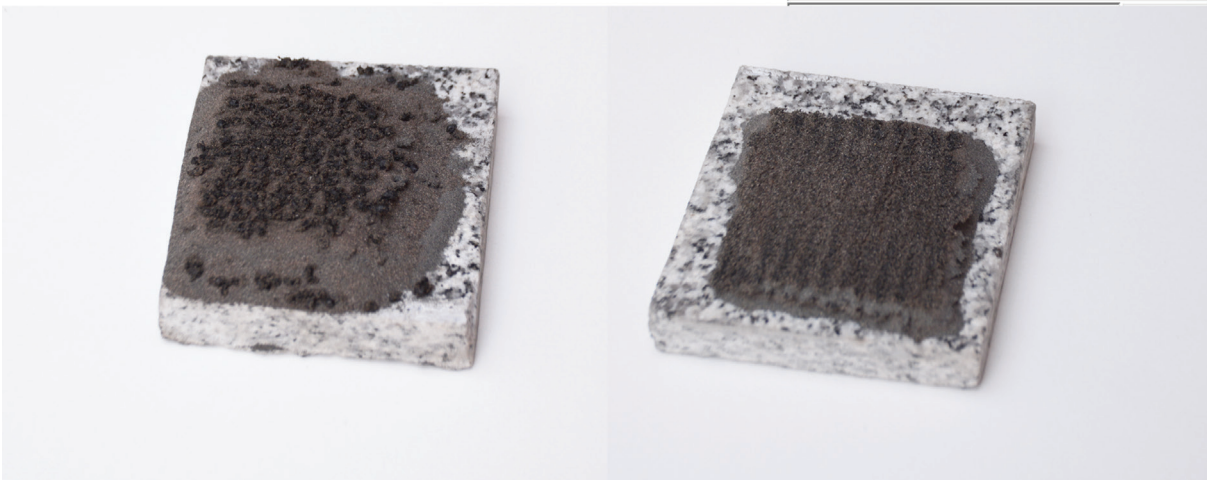
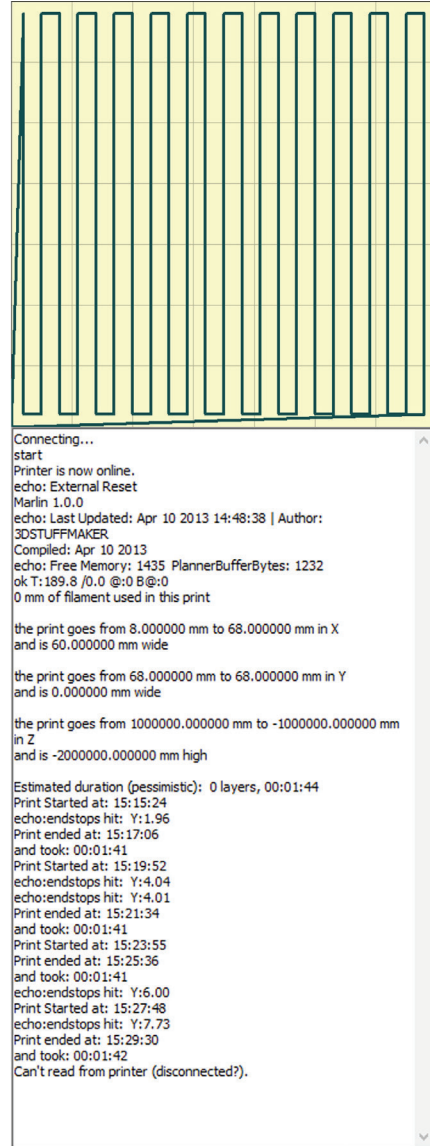
Temperatura = 1289°C

Tiempo por capa = 1'44"

Tiempo total = 7'00"

Para esta prueba se decidió tomar un enfoque tipo sinterización. Se aumentó la superficie, se redujo el diámetro de nozzle y se usó una alta velocidad. La probeta se desmoronó sin resistencia alguna. Las partículas sinterizadas apenas alcanzaron a juntarse.

Se hizo también una prueba inicial con setting similar a probetas 1 y 2.



PROBETA 4 (14-02-2020)

; layer_height = 2.5 y 5 mm
; nozzle_diameter = 4 y 6 mm
; perimeter_speed = 10 y 1 mm/s

Irradiancia promedio = $1135 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

Temperatura = 1203°C

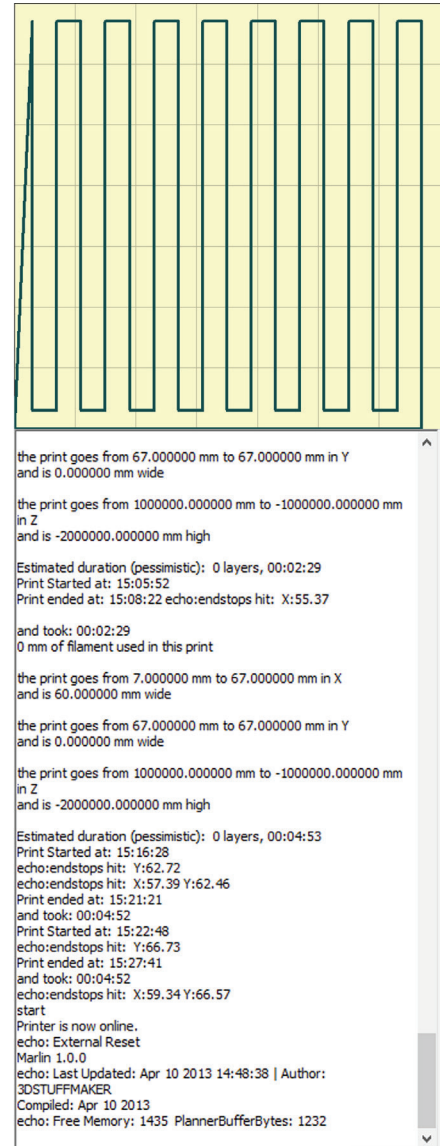
Tiempo por capa = 4'53" y 22'30"

Tiempo total = 9'46" y 45'00"

Prueba mixta, con intercalado de tratamiento de fusión y de sinterización.

La probeta se desmoronó sin resistencia alguna.

Los pellets formados mostraron buena resistencia al tacto, a pesar su forma alargada.



PROBETA 6 (18-02-2020)

; layer_height = 1 mm
; nozzle_diameter = 3 mm
; perimeter_speed = 1.3 mm/s

Irradiancia promedio = $1152 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$

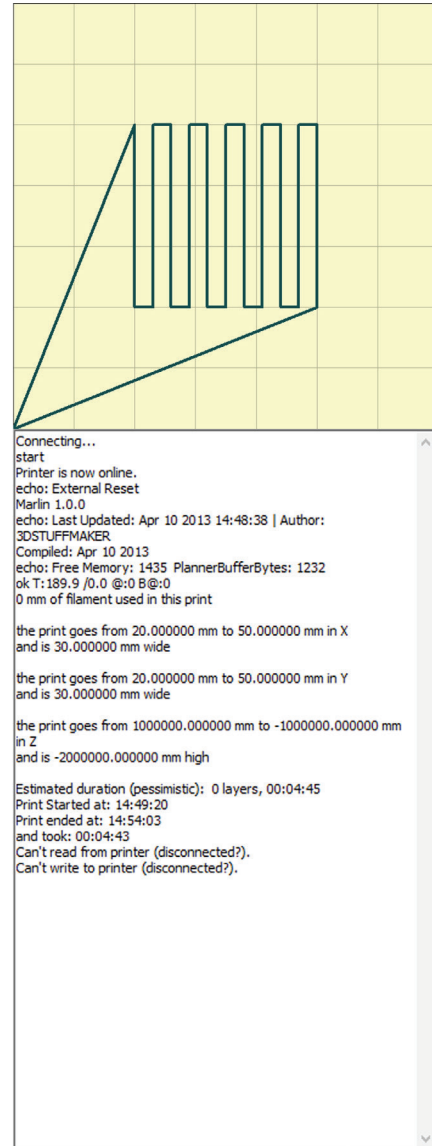
Temperatura = 1094°C

Tiempo por capa = 4'45"

Tiempo total = 4'45"

Habiendo fracasado las pruebas en el objetivo de generar una capa de material, se decidió mezclar relave con fundentes, arena y agua, en razón 1:1:1. La probeta se fusionó de forma exitosa.

Esta prueba permitió calcular relación entre energía y volumen. Según Irradiancia x Área Fresnel x Tiempo Impresión / Altura de Capa x Superficie Probeta, tenemos: $1162 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2} \cdot 0.3632 \text{ m}^2 \cdot 285 \text{ s} / 0.1 \cdot 3.5 \cdot 4 \text{ cm} = 85.915 \text{ kJ}\cdot\text{cm}^{-3}$.



PROBETA 7 (19-02-2020)

; layer_height = 2 mm
; nozzle_diameter = 3 mm
; perimeter_speed = 2 mm/s

Irradiancia promedio = $1145 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

Temperatura = 1123°C

Tiempo por capa = 3'04"

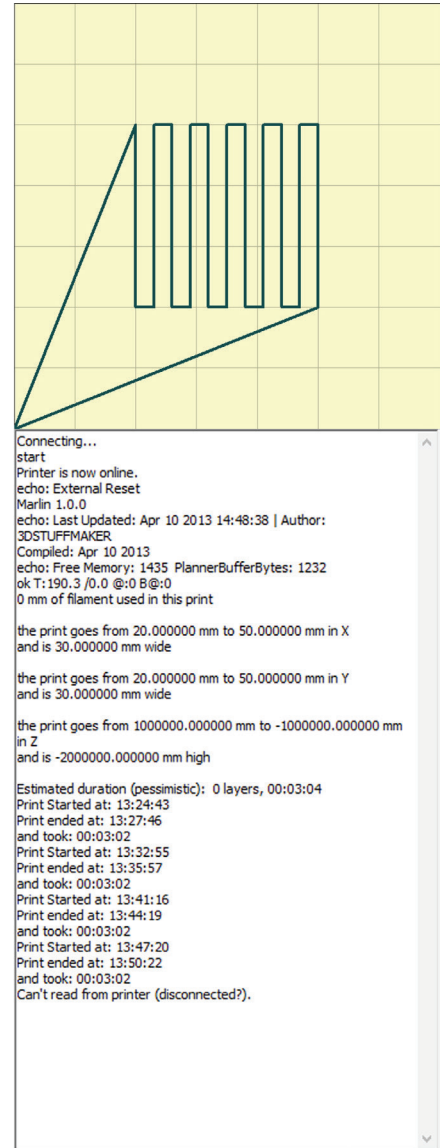
Tiempo total = 9'46"

A la geometría anterior se le aumentó la velocidad y se probó con 4 capas superiores.

Se usó, en adelante, una razón de volumen entre relave-arena-agua de 5:2:3.

Las nuevas capas de mezcla acuosa de relave se esparcieron con una espátula, con un resultado poco uniforme, que superaba 1 mm esperado.

No fue posible establecer relación entre exposición y volumen en estas condiciones.



PROBETA 8 (20-02-2020)

; layer_height = 2.5 mm
; nozzle_diameter = 3.5 mm
; perimeter_speed = 1.5 mm/s

Irradiancia promedio = $1162 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$

Temperatura = 1274°C

Tiempo por capa = 2'40" y 10'00" (aprox.)

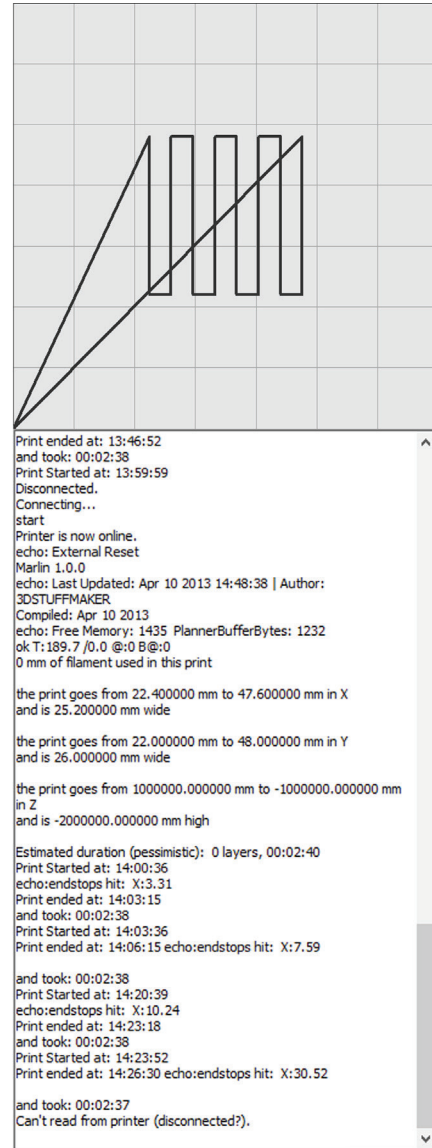
Tiempo total = 5'20" y 20'00" (aprox.)

Prueba mixta, con intercalado de tratamiento de fusión mecánico y manual.

El primer tratamiento manual no fue prolijo, dificultando el dimensionamiento.

No fue posible establecer relación entre exposición y volumen en estas condiciones.

La aplicación manual del tratamiento demandó un esfuerzo físico considerable.



PROBETA 9 (21-02-2020)

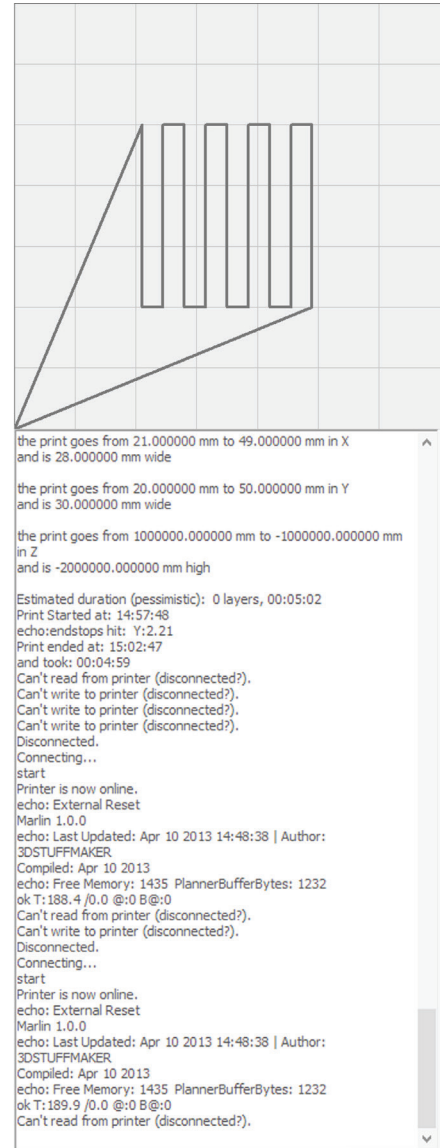
; layer_height = 2.5 mm
; nozzle_diameter = 3.5 mm
; perimeter_speed = 1 mm/s

Irradiancia promedio = $1147 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$
Temperatura = 1272°C
Tiempo por capa = 5'00" y 10'00" (aprox.)
Tiempo total = 20'00" y 40'00" (aprox.)

Prueba mixta, con intercalado de tratamiento de fusión mecánico y manual.

El volumen resultante, más prolijo, tenía dimensiones 3x3x1 cm aprox., por lo que la relación energía/volumen fue: $166.636 \text{ kJ}\cdot\text{cm}^{-3}$.

Lamentablemente, el material se agrietaba por el diferencial de expansión térmica en caras contrarias del volumen, por lo que se quebró.



2. En terreno



Fig. 103. Vista de relaves de CMC Sali Hochschild desde el cerro aledaño, Copiapó. Fuente: M. Barrionuevo.



Dado el nivel de desarrollo de las probetas al momento de viajar al desierto de Atacama, no se esperó hacer grandes hallazgos con respecto al material, por lo que la probeta 5 no fue incluida en este registro. La importancia del viaje se enfocó en hacer hallazgos fuera de la máquina, entendiendo el proceso holístico de la fabricación in-situ en el territorio hostil desértico, y atendiendo a la factibilidad de replicar el proceso llevado a cabo en el entorno controlado de Santiago.

Consideraciones importantes:

- No se presentó una situación en Santiago donde la velocidad del viento fuera un factor determinante para el tratamiento, el cual se vio interrumpido o dificultado por rachas de viento que esparcían el árido al momento de depositarlo. En momentos determinados, incluso fue capaz de mecer el lente de Fresnel.
- El flujo de radiación solar no fue significativamente mayor, y desde la experiencia de la fusión del árido, no se notaron diferencias. Se realizó una comparación, los días que duró el viaje, con datos del medidor solar encintado a un brazo del Fresnel, cifras que comparadas gráficamente, tienen gran similitud, con excepción de la presencia de nubes por la mañana en Copiapó (Fig. 104).
- En una hora dada, el ángulo de incidencia varía en 6° con respecto al de Santiago. Esto es coherente con la diferencia en los grados de latitud de ambas ciudades.
- El entorno de trabajo desértico es muy polvoso, lo cual afecta en mayor medida a los instrumentos mecánicos, electrónicos e inclusive ópticos. Podría considerarse cercar el espacio circundante al experimento.

Fig. 104. Comparación de irradiancia solar entre Copiapó y Santiago, medidas entre 15 y 18 de febrero. Elaboración propia.

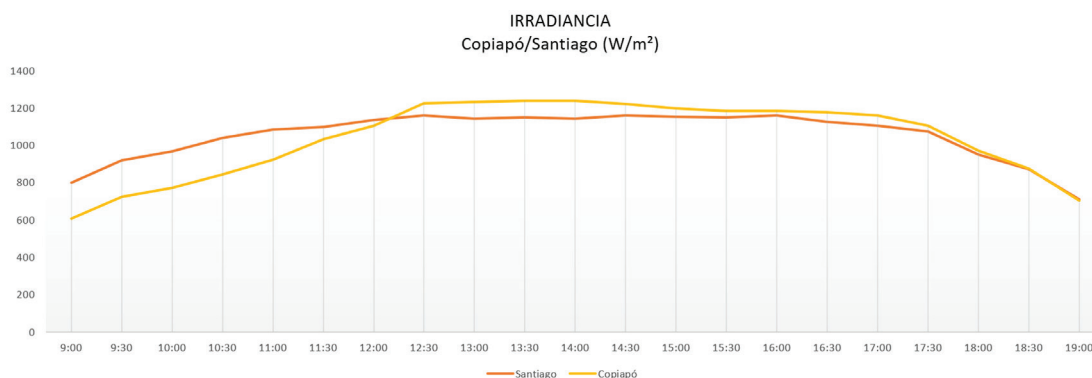


Fig. 104-111. Instantáneas de tratamiento en Copiapó: sector contaminado, tamizaje, probeta, medición. Elaboración propia.



4.1.3 Ensayos

Para la comparación de propiedades físicas con el ladrillo cerámico artesanal, se realizó una caracterización física basada en los requisitos establecidos en anexo B de NCh 2123 Mod.2003.

Se calculó densidad dividiendo la masa de una muestra del material, pesado en balanza analítica, por su volumen, establecido con la diferencia de nivel de agua en jeringa con y sin muestra, dando **2.4581 g·cm⁻³**.

La composición geoquímica del relave usado fue 30.28% SiO₂, 6.08% Al₂O₃, 19.1% Fe₂O₃ y 26.2% CaO. El resto fue PPC, MgO y NaO₂.

Las pruebas de compresión y de absorción fueron realizadas con ayuda del personal del Centro de Biomateriales e Ingeniería de la Universidad del Bío Bío. Los equipos usados fueron: máquina de ensayos mecánicos marca Instron modelo 4468, con Software serie IX de Instron; y balanza analítica digital ArchiMed.

1. Absorción de agua

El Anexo B de NCh2123 establece ensayo de absorción de agua en unidades de ladrillo cerámico artesanal. La NCh167 indica que los ladrillos enteros deben ser pesados con tolerancias de 0.5 g, para luego sumergirse completamente en agua por 24 horas, tiempo después del cual deben ser pesados nuevamente y sus masas comparadas. La absorción máxima es de 22%.

Las muestras pertenecieron a los pedazos que resultaron de la Probeta 9. Para la prueba de compresión se lijaron y se dimensionaron, pero fueron sólo refundidos para calcular porcentaje absorción.

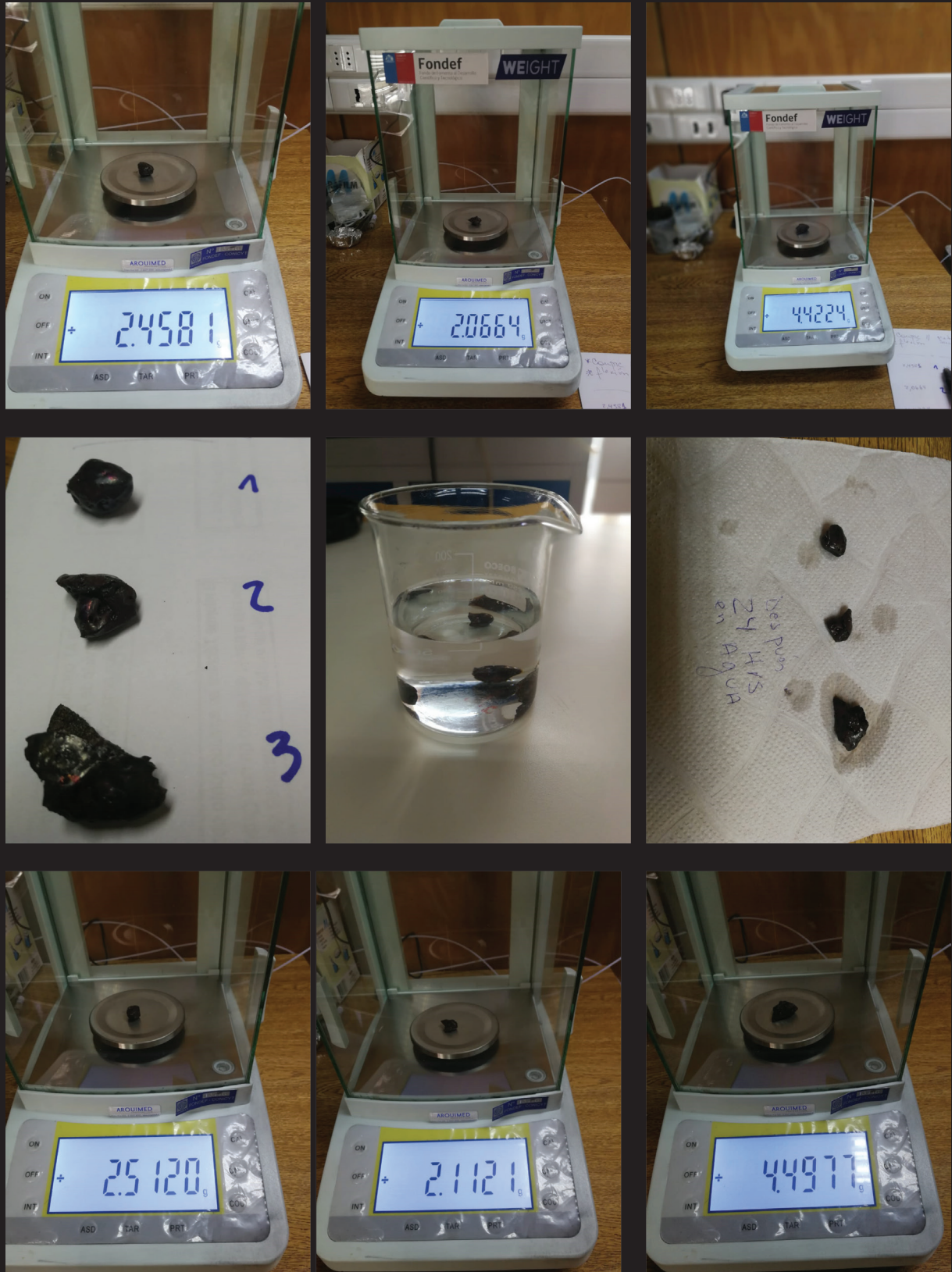
Con el pesaje de la muestra 1 se pudo establecer la densidad del material, ya que se había calculado su volumen.

Los ensayos demostraron que el material tiene menor absorción de agua, con **2.04%** de agua en promedio, la décima parte de lo que establece la norma.

Fig. 112. Comparación de muestras. Elaboración propia.

N° Muestra	Muestra Inicial (g)	Muestra Final (Dia Agua) (g)	Absorción de Agua (%)
1	2,4581	2,5120	2,12
2	2,0664	2,1121	2,21
3	4,4224	4,4977	1,7

Fig. 113-121. Ensayo de absorción: pesaje muestra seca, inmersión en agua por 24 horas y pesaje muestra final . Fuente: C. Droguett.



2. Resistencia a la compresión

INN establece para ensayo de compresión que, a una muestra de al menos 6 ladrillos, se los corte en mitades cuadradas, sean refrentados con azufre y se les cargue hasta 4 MPa, o $40.78 \text{ kgf}\cdot\text{cm}^{-2}$, a velocidad 20 MPa por minuto, con prensa mecánica.

Al no poder lograr esas dimensiones, se estableció el ensayo sobre la comparación volúmenes idénticos, en 6 probetas de dimensiones pareadas. Se aplicó esfuerzo constante a 0.5 mm por minuto, resultando carga máxima promedio 1.61 kN (relave) y 1.38 kN (ladrillo), por ello, el primero es 1.16 veces más resistente a la compresión.

Fig. 123. Dimensión mm: P2 11x11x5; P5 12x12x5. Elab. propia.

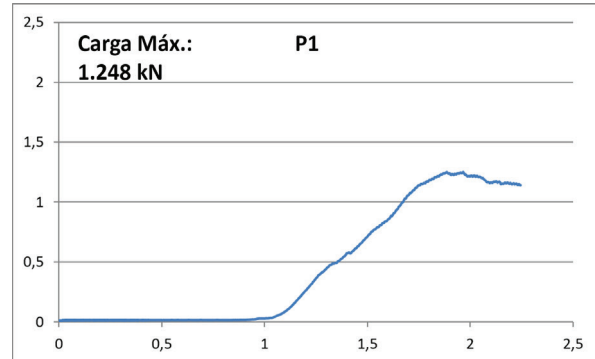
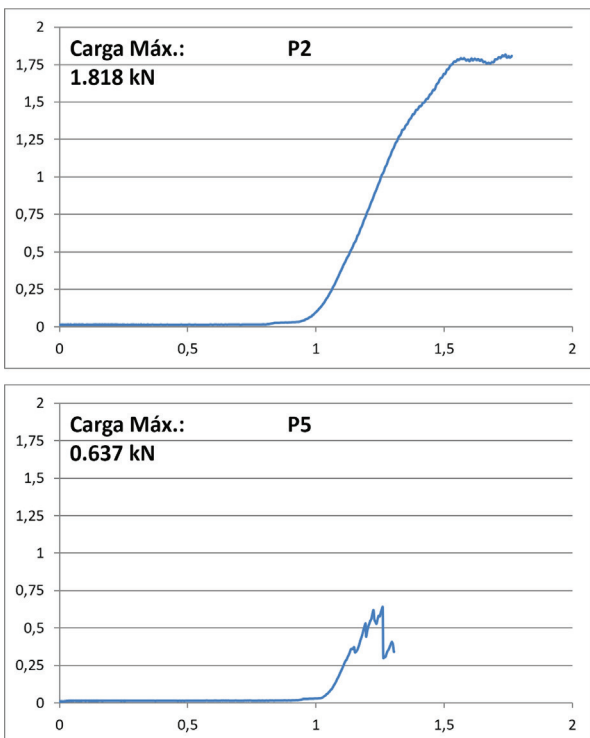


Fig. 122. Dimensión mm: P1 10x10x5; P4 10x10x5. Elab. propia.

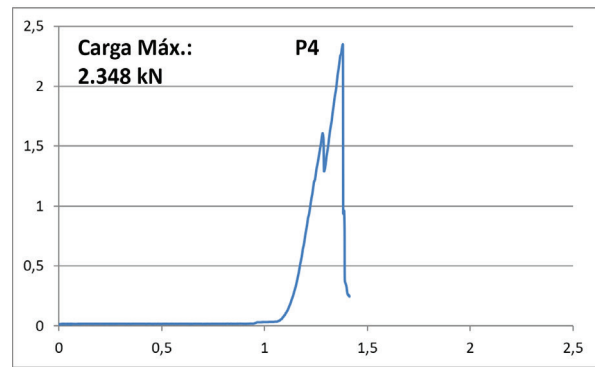


Fig. 124. Dimensión mm: P2 13x13x7; P5 13x13x7. Elab. propia.

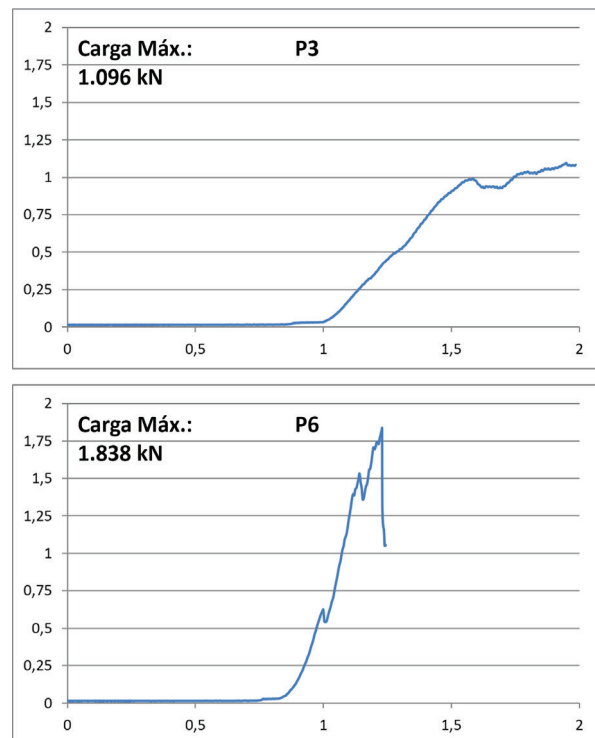


Fig. 125-132. Ensayo de compresión: lijado, dimensionado, numerado, comprimido con prensa Instron. Fuente: Elab. propia y C. Droguett..



4.2 Aplicaciones constructivas especulativas

Para ampliar el espectro de utilidad que este material potencialmente posee, se usó un mecanismo de tabla comparativa simple. Con la misma se pudo establecer la relación entre la impresión solar frente a soluciones constructivas genéricas.

Esta tabla se compuso de 3 columnas: familias de objetos de la construcción según la manera en que conforman unidades mayores, soluciones genéricas de construcción extraídas de listas oficiales de la DITEC y propuestas de aplicación especulativa en base al sistema de impresión solar por lente de Fresnel.

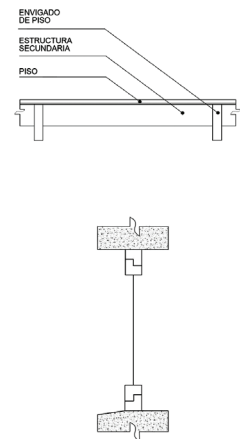
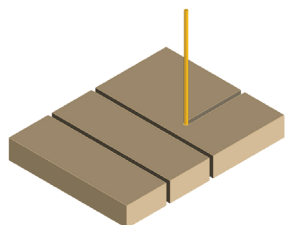
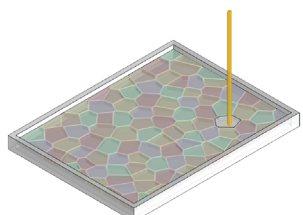
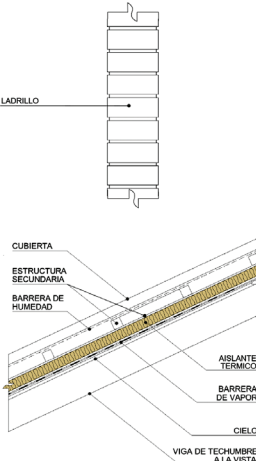
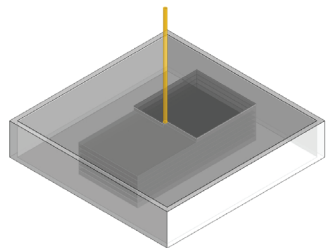
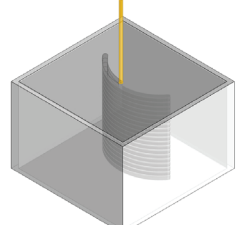
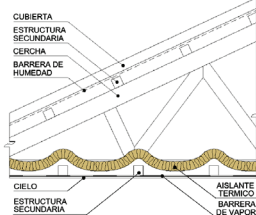
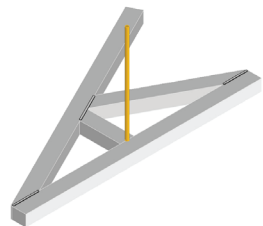
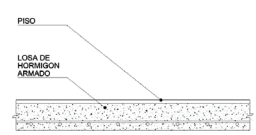
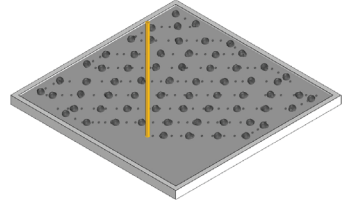
Las familias se dividieron en cuatro grupos de materiales: laminables, o aquellos que son cortados en piezas para su ensamble o junta, como la madera o el vidrio; morterizables, o aquellos que requieren de un pegamento para adosarse, como los ladrillos cerámicos; fundibles, o aquellos que pueden fusionarse y soldarse, como los metales; y conglomerables, o aquellos que constituyen una unidad cohesionada a partir de fragmentos de diversos materiales mediante transformaciones químicas, como el cemento y el hormigón.

En esa misma columna se detallan tipos de elementos de la construcción que utilizan objetos de las familias descritas. De esta forma, un piso con entramado es revestido por madera laminada; una ventana soporta una lámina de vidrio; un muro de albañilería se forma de ladrillos y mortero; una cubierta de techumbre se recubre con teja cerámica; una techumbre con cercha puede usar perfiles metálicos soldados para formarla; y un piso con losa será de cemento.

Las soluciones constructivas elegidas son 6: Techumbres 1 y 4, Muro 3, Pisos 1 y 5, y Ventana 1 del Manual de Soluciones Constructivas Genéricas de la DITEC.

1. Cortar piezas de madera con un haz concentrado de luz solar. También es aplicable para grabados y texturizados.
2. Fundido de mezcla de arena y colorantes naturales para producir vidrio, que puede ser devastado y pulido.
3. Fusión por capas de relave + fundente para formar bloques vitro-cerámicos.
4. Fusión por capas de relave + fundente para formar losetas vitro-cerámicas.
5. Soldadura solar de agentes fundibles en juntas de perfiles metálicos.
6. Fusión de cama de árido para formar grupúsculos vitro-cerámicos de diversa granulometría. Podría usar relave de forma exclusiva.

Fig. 133. Tabla comparativa. Elaboración propia.

FAMILIA Y TIPO	SOLUCIÓN CONSTRUCTIVA	APLICACIÓN CONSTRUCTIVA ESPECULATIVA
<p>LAMINABLE</p> <p>Piso con Entramado</p> <p>Ventana Vidriada</p>		<p>Corte y grabado de material de origen vegetal.</p>  <p>Vitrificación traslúcida y quebradiza de árido.</p> <p>Demanda arena.</p> 
<p>MORTERIZABLE</p> <p>Muro de Albañilería</p> <p>Cubierta de Techumbre</p>		<p>Fusión vítrea, por capa, por molde o por deposición, de áridos.</p> <p>Reutiliza relave.</p> <p>Demanda fundente.</p>  
<p>FUNDIBLE</p> <p>Techumbre con cercha</p>		<p>Fusión de piezas metálicas.</p> 
<p>CONGLOMERABLE</p> <p>Piso con Losa</p>		<p>Fusión, en distintas granulometrías, de áridos.</p> <p>Reutiliza relave.</p> 

4.3 Enfoque de Ciclo de Vida

Debido a la naturaleza incipiente del material propuesto, así como a la ineficiencia del sistema de fabricación, no es factible cuantificar todas las entradas y salidas del proceso productivo, por lo que un Análisis de Ciclo de Vida se hubiera limitado a un inventario de Etapa de Producto. En su lugar se realizó un Enfoque de CV, que señala que basta “pensar cuidadosamente en las etapas del ciclo de vida que la organización puede controlar” (ISO, 2015). Ello implica: (1) determinar aspectos ambientales; (2) controlar actividades que puedan influir; (3) conocer impactos ambientales; (4) tener en cuenta el Ciclo de Vida. La norma ISO 14004: 2016 presenta una guía práctica que considera lo siguiente:

- Etapas en el ciclo de vida del producto.
- Grados de control e influencia sobre etapas del CV.
- Vida útil del producto.
- Influencia/longitud cadena suministro.
- Complejidad tecnológica del producto.

Primero, se deben identificar las etapas del Ciclo de Vida completo del producto. La mayor parte del relave en Chile se produce en el procesamiento de sulfuros de cobre, principalmente en la etapa de flotación o concentración del material chancado, después del cual es depositado en un tranque.

El proceso de fabricación del producto vitro-cerámico comienza en el depósito seco, de donde se extraen los áridos. Estos pasan por un tamizaje, y luego se mezclan con arena y agua en proporción 5:2:3. Este compuesto se almacena en un contenedor y luego se aplica en la sufridera, para ser procesado usando la impresora de concentración solar. Hecho el producto, este se encuentra a disposición del constructor, lo cual habilita una construcción in-situ para los casos cercanos al relave y con buen acceso solar. El ladrillo de relave se ocuparía igual que uno tradicional hasta el momento de su descarte, cuando, gracias a sus propiedades vítreas, puede ser refundido y reciclado.

Fig. 134 v 135. Bozqueo inventario para Etapas ACV v Etapa de Producción de vitro-cerámicos de relave por impr. solar. Elaboración propia.

ETAPAS CV	SUBPROCESO	ENTRADAS-SALIDAS
Materia Prima	Relave Arena Agua	Materia prima Materia prima Materia prima
Producción	Tamizaje Fusión impresora solar Lijado	Energía eléctrica Petróleo
Distribución	Transporte	Petróleo

ETAPAS PRODUC.	SUBPROCESO	ENTRADAS-SALIDAS
Tamizaje	Tamices	
Fusión Impresora	Fundente Transporte máquina	Petróleo
Lijado	Lijas	

Los grados de control de los participantes del proceso sobre sus etapas de vida pueden ser: diseñador elige relave y mezcla; constructor puede reciclar desechos de impresión y usar morteros hechos con relaves; usuario final puede reciclar producto.

Los grados de influencia de los participantes del proceso sobre sus etapas de vida pueden ser: diseñador afecta la forma del producto, y con ello, su armado; constructor puede afectar la manera en que se dispone el producto, que puede ser más o menos contaminante; usuario final decide de qué manera reciclar el producto.

Ya que el proceso de manufactura es un sistema de personalización en masa, tiene la capacidad de entregar responsabilidad y autoría al usuario final, que puede convertirse tanto en diseñador como constructor del producto, si bien el sistema de albañilería deberá ser armado de la forma tradicional.

La caracterización de la vida de producto es limitada para el nivel de implementación del mismo. Sin optimizar, su desarrollo se enfoca a un público local y reducido, con tiempos de producción ineficientes. El crecimiento del mismo se da una vez exista un volumen de producción considerable, lo cual puede tomar mucho tiempo pero, a la vez, pocos recursos.

Una etapa de madurez aceptable dependería del grado de penetración que el sistema tenga sobre una población de usuarios. La obtención y armado de la máquina puede evitar que el usuario final se familiarice. El declive del producto puede ser una nueva oportunidad de uso, reprocesado.

La influencia en la cadena de suministro es relativa a las maneras que el diseñador de producto reduce niveles de uso e impactos de la cadena productiva. El sistema de impresión solar tiene su mayor influencia en la obtención de materia prima (el relave ya se encuentra abandonado o ubicable) y menor influencia en la adquisición de partes de la máquina, como motores, correas, etc.

La longitud de cadena de suministro no es posible de estimar debido a falta de información respecto a tiempos de provisionamiento, producción y distribución. Un sistema optimizado, en el desierto, junto a un relave, podría no necesitar mantener materias primas en espera de su utilización, pasar a etapa de producción de inmediato y distribuir el producto localmente.

La complejidad tecnológica es alta, y se concentra en la fabricación, en la etapa de Producto. Componentes complejos dificultan interoperabilidad. Esto puede afectar la interacción que tenga con el usuario e incluso con el constructor.

Los aspectos ambientales son cada parte de las actividades de una organización que puedan afectar al medio ambiente, negativa o positivamente. Estos pueden agruparse en:

- emisiones a la atmósfera
- contaminación de la tierra
- vertidos líquidos
- uso de recursos naturales
- desechos sólidos
- desechos peligrosos

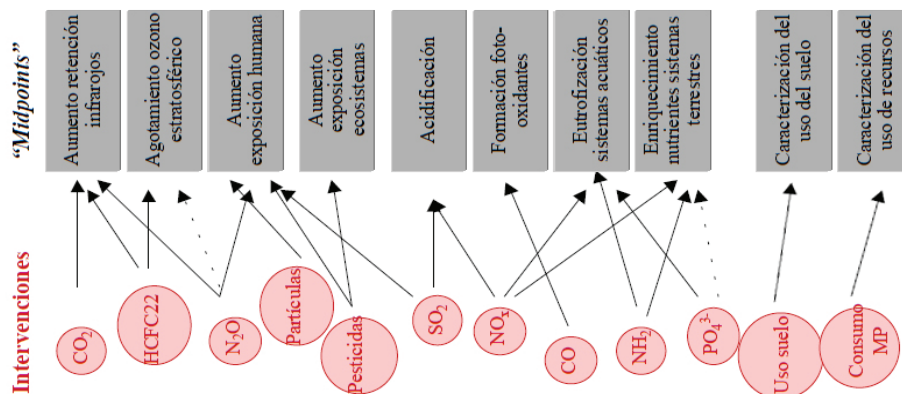
El proceso emite SO_2 a la atmósfera, cuyo volumen debe calcularse; no contamina la tierra, de hecho, ayuda a descontaminarla; el material relave puede mezclarse con agua, las cuales no pueden ser devueltas a cursos de agua natural por su contenido objetable de arsénico, mercurio, etc.; puede ocupar cantidades importantes de arena y agua; sus desechos pueden ser reintegrados al proceso; sus componentes objetables se encuentran en el orden de trazas, así que no produce desechos peligrosos.

Los impactos ambientales del enfoque de CV son cualquier cambio en el medio ambiente, adverso o beneficioso, resultado de la actividad de una organización, ya sea de forma total o parcialmente. Son:

- calentamiento global (CG)
- formación foto-oxidante (FO)
- agotamiento ozono (AO)
- acidificación (A)
- enriquecimiento de nutrientes (EN)

El sistema de impresión solar no emite CO_2 ya que sus componentes no contienen carbono y la máquina puede ser accionada completamente por energía solar, incorporando celda fotovoltaica. Por ende, no contribuye al CG ni FO. No produce N_2O que agota ozono. El óxido fosfórico, P_2O_5 , es limitado, pero podría contribuir al enriquecimiento de nutrientes. Su contenido de SO_2 , hasta un máx. de 16%, causaría un impacto ambiental, ya que, al combinarse con el ozono, produce lluvias ácidas.

Fig. 136. Relación entre intervenciones ambientales e impactos de efectos intermedios. Fuente: CML 2000.

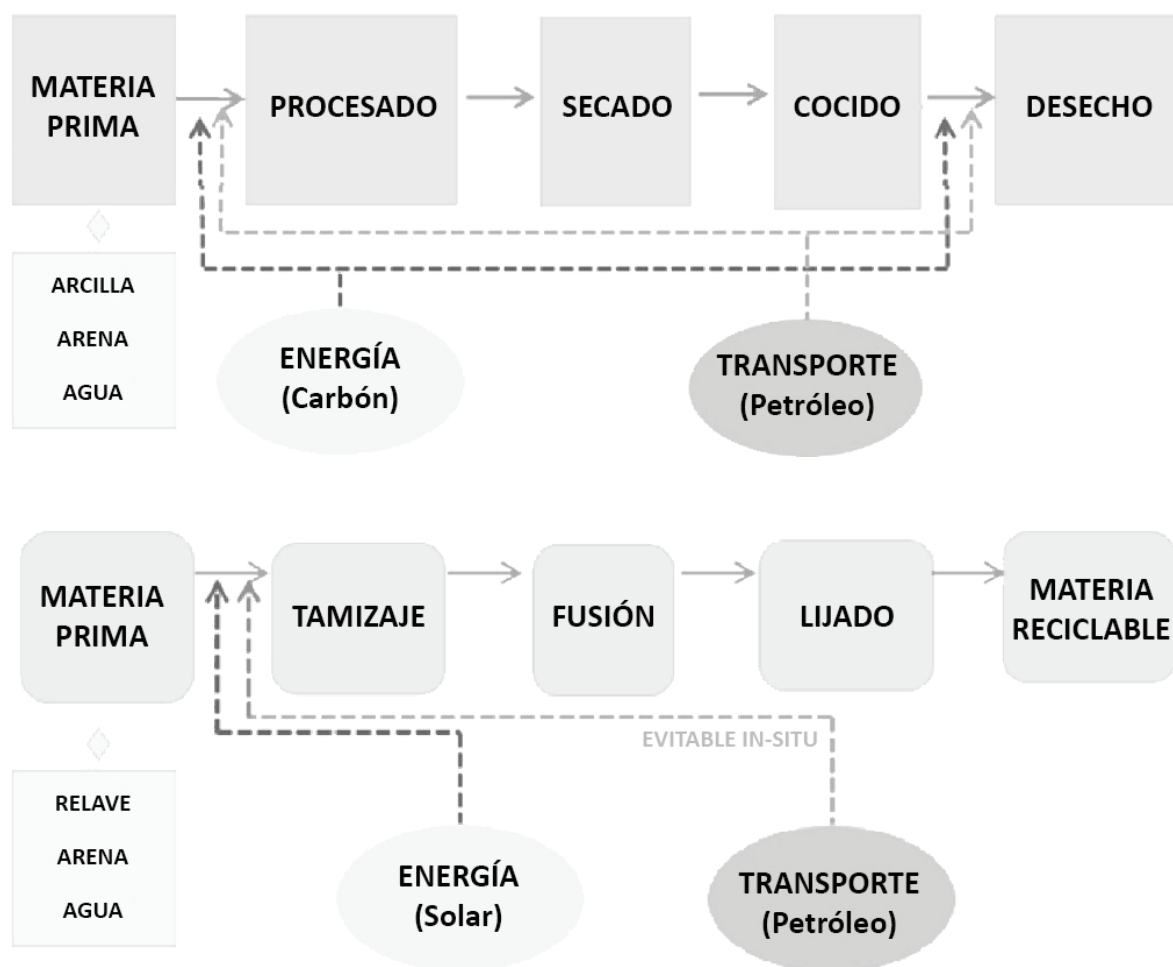


En comparación con los bloques vitro cerámicos de impresión solar, el proceso de elaboración de ladrillos tradicionales es menos sustentable. En primer lugar, su Ciclo de Vida muestra un proceso lineal, con explotación de recursos naturales, uso de energías contaminantes, producción de gases de invernadero y desecho poco reciclable. Requiere, al menos, dos módulos de Transporte, de la mina al procesado y del cocido al consumidor, indicado en Fig. 138.

En segundo lugar, y si bien es un proceso más sencillo y accesible que el de fusión de relave, provee de menos grados de control y de influencia a los participantes del proceso, los cuales normalmente están separados.

El sistema de impresión solar de relave no sólo posee características físicas y mecánicas más atractivas, aunque incipientes, que el ladrillo tradicional, sino que presenta mejores prestaciones ambientales al ecosistema.

Fig. 137. Comparación de Ciclos de Vida de proceso de elaboración de ladrillo tradicional y fusión solar de relave. Elaboración propia.



4.4 Análisis y discusión de resultados

Los principales resultados del capítulo de desarrollo son datos extraídos de las pruebas realizadas en su fase de implementación y ensayo, en cuanto son evidencias medidas y contrastadas que ayudan a especular un posible impacto de este material en la construcción y en corroborar la naturaleza sostenible y circular del sistema.

El tratamiento solar del relave permitió establecer 3 tipos de procedimientos: granular, produce pellets de relave fundido sin aditivos; fundido por capa, que necesita $85 \text{ kJ}\cdot\text{cm}^{-3}$, aún no ensayado; y mecánico-manual, con $166 \text{ kJ}\cdot\text{cm}^{-3}$, ensayados.

Este cerámico vítreo no soporta la tracción adecuadamente, por lo que su aporte para la elaboración de estructuras habitables sería sólo para resistir esfuerzos a compresión. Al menos 6 soluciones constructivas genéricas podrían beneficiarse de la impresión solar.

En base a muestras reducidas se determinó que es **1.16 veces más resistente a la compresión y que absorbe la décima parte del agua que un ladrillo cerámico** (Fig. 138 y 139). A su vez, tiene densidad similar, de $2.45 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Basado en el sistema mecánico-manual, se necesitan **448.2 MJ** para fundir los 2700 cm^3 de un ladrillo fiscal. A la tecnología actual, con Fresnel de un m^2 , con los $1034 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ en promedio registrados en Copiapó entre 9 am a 7 pm, le tomaría **119 horas**, o 12 días a 10 horas laborables, **hacer un solo ladrillo**. El depósito de relave de CMC Sali Hochschild tiene un volumen aprobado de $3'202,671 \text{ m}^3$ (Sernageomin, 2020). Con tamiz n°60, quedarían **1'739,050 m^3** disponibles, a los cuales el sistema actual le tomaría reutilizar **8.74 millones de años**.

Aunque los resultados alcanzados aún son muy incipientes, confirman las perspectivas de interés sobre una construcción más sustentable para localidades extremas, por lo que la investigación del material de relave y la manufactura solar debería continuarse.

Fig. 139. Resultados cuantitativos del desarrollo de la investigación. Elaboración propia.

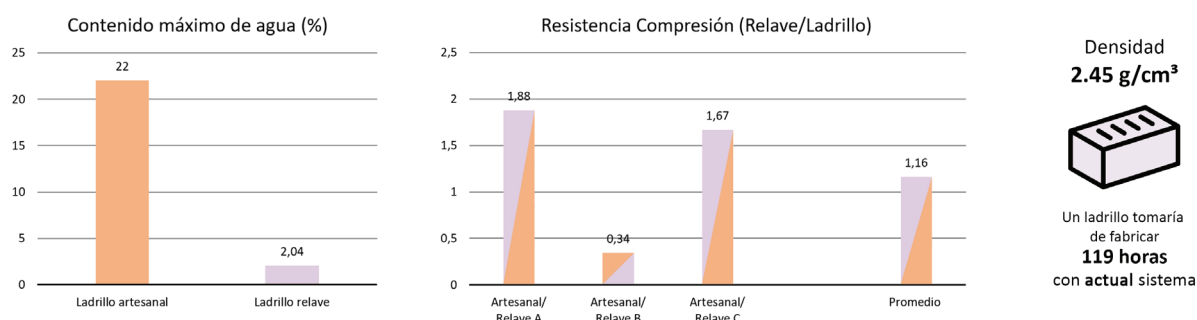
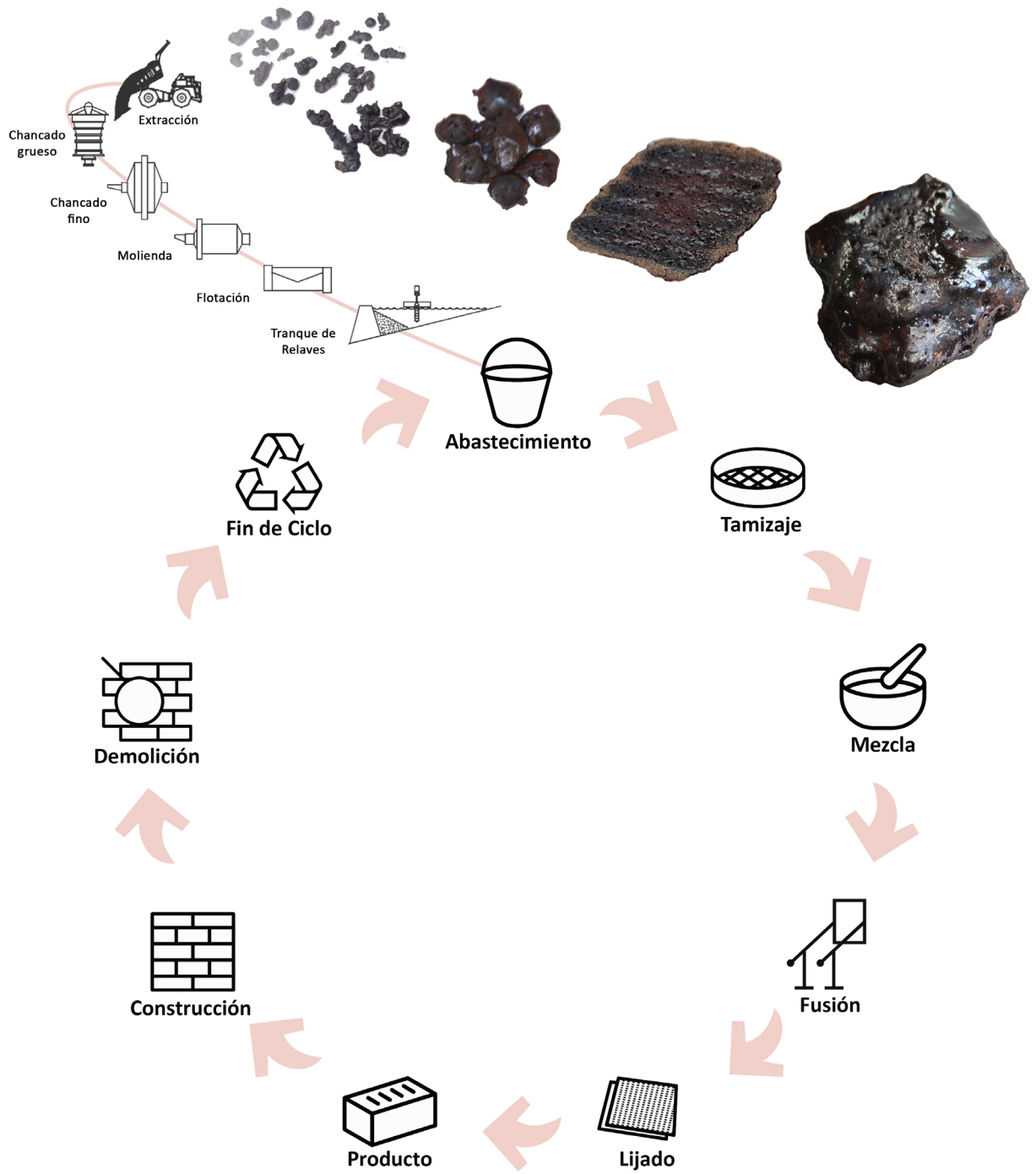


Fig. 140. Diagrama tentativo de Ciclo de Vida de vitro-cerámicos de relave fundido por concentración solar. Elaboración propia.





5.1 Sobre las preguntas de investigación

El propósito de este estudio fue desarrollar un incipiente material sustentable, con propiedades probables y medibles para la construcción. Mediante el proceso de impresión solar de relave fue posible obtener un material vitro-cerámico con cualidades físicas y ambientales más favorables que las del ladrillo fiscal cerámico. El proceso investigativo logró responder las siguientes preguntas:

¿Cómo se atiende el problema del relave en Chile desde la materialidad constructiva?

En los últimos años, en Chile y el mundo, el problema de los desechos de la minería industrial, dígase escorias, estériles y relaves, ha comenzado a ser visibilizado en sus perspectivas económicas. Esto responde a un cambio cultural de investigadores, empresas y el sector público, que empiezan a asociar a los pasivos de la industria como la línea de entrada de activos emergentes.

Diversos estudios chilenos, algunos de ellos fomentados por la universidad y el estado, reportan posibilidades materiales que este desecho puede ofrecer a la construcción. Su repercusión en el grueso de la población sigue siendo muy escasa, lo que puede deberse al enfoque industrial que lo dirige.

Por ello, el potencial del estudio de este material está muy subdesarrollado para las perspectivas de uso del ciudadano común, siendo necesario que disciplinas con un impacto social transversal, como la arquitectura y el urbanismo, se preocupen por su inserción a nivel cultural, ya que los estudios de factibilidad y medición material los pueden realizar profesionales técnicos entrenados en esas ciencias exactas.

El cambio de mentalidad para el desarrollo de materiales constructivos responsables ambientalmente debe ser dirigido desde las necesidades de las personas, que hoy sufren carestía en su nivel de vida, y no desde la rentabilidad de consorcios dueños de recursos contaminantes.

¿De qué manera es posible producir un material sólido y modular, comparable al ladrillo cerámico, usando la manufactura aditiva “Solar sinter”?

Tal y como se menciona en la hipótesis, esta exploración material se hizo posible gracias al proceso de impresión solar basado en el sistema de manufactura aditiva “Solar sinter”. El mismo requirió del diseño y armado de un mecanismo que derritiera, de forma controlada y medible, una cama de áridos de relave, para producir volumetrías en base a la acumulación por capas de material fusionado.

Después de varias pruebas y ensayos, se logró comprobar la capacidad del sistema para producir un material sólido, duro y frágil, de característica vítrea, usando relave, arena y agua. No fue posible dar forma a un volumen a partir de sucesión de capas del material fundido, por lo cual, se optó por un tratamiento más artesanal con el cual la producción de bloques pequeños fue posible. Se aplicaron ensayos mecánicos que resultaron satisfactorios en comparación a bloques de ladrillo de tamaño similar.

Aunque ofreció resistencia, su técnica de fabricación es muy ineficiente y su viabilidad económica depende de procesos previos de preprocesamiento del material mediante extrusión que no son parte de este trabajo, y que pueden optimizar resultados futuros, donde un sistema laminado o de gránulos dirija la pauta a investigar.

¿Qué aplicaciones constructivas son posibles de prever tanto para la impresión solar de relave minero como para el sistema de concentración solar mecanizado?

A pesar de su estado embrionario, este sistema de materialización circular, tanto en su producción de vitro-cerámicos de relave, así como en el proceso mismo de la concentración automatizada de luz solar, presenta grandes perspectivas de aplicación para la construcción.

Como se pudo establecer en la tabla comparativa, diversas familias de objetos destinados a la construcción pueden verse beneficiados por este sistema. Aquellos que ocupan el desecho minero, podrían fabricar objetos comunes de la construcción, como bloques, láminas, baldosas, tejas, etc., a costos muy bajos e incluso con sello verde por sus prestaciones ambientales.

Adicional a esto, de implementarse un sistema con tolerancias más finas, se podría explotar el volumen teórico de árido para producir formas libres, con doble curvatura, etc. También se levanta la posibilidad de producir áridos artificiales de diversos grosores usando sólo el desecho minero y la luz solar.

Por último, el calor concentrado en un haz de luz perpendicular a la superficie donde actúa, y según su intensidad, podría llegar a producir cortes en madera u otros tipos de elementos, así como fundir y soldar metales. Este tipo de sistema, empero, sería altamente tecnologizado y poco accesible.

Las perspectivas de uso de energía renovable solar en Chile, siguen siendo un tema que levanta mucho interés de diversos sectores de la sociedad, pero cuyos esfuerzos tangibles siguen siendo más bien escasos para una de las regiones con mayor potencial solar del orbe.

Este trabajo representa un sincero esfuerzo por conectar la materialidad arquitectónica con el incentivo económico que puede emerger de la abundancia de recursos de los entornos extremos, entendiéndose ellos no como la frontera física donde comenzamos a sentirnos incómodos, sino donde la incomodidad nos obliga a volver a pensar en respuestas primarias, prácticas, sustentables.

¿Presenta ventajas comparativas respecto a su impacto ambiental frente a técnicas tradicionales como la producción de ladrillo cerámico artesanal?

La característica más importante del material resultante guarda mayor relación con su origen que con sus propiedades físicas, aún de poca trascendencia. Es la condición despreciada y abundante del árido de relave que hace posible diseñar un proceso de manufactura sustentable.

Las etapas de producto y fin de vida del CV presentan perspectivas de bajo impacto ambiental en comparación a la producción del ladrillo cerámico artesanal, el mismo que sigue lógicas de producción lineal, explotando recursos naturales, utilizando energías no renovables como el carbón para su cocción o derivados de petróleo para su transporte, los que producen gases de efecto invernadero, etc.

La extensa distribución de este material a lo largo del territorio chileno permite asumir una disponibilidad futura del bloque vitrocerámico respecto al ladrillo tradicional. Se debe recordar que la arcilla que sirve idealmente a este material no se encuentra disponible en todo el territorio, volviendo al ladrillo dependiente de zonas geográficas específicas, condición que imposibilita un mayor y mejor acceso a este producto.

Si bien la síntesis material incipiente pero más responsable con el medio ambiente del proceso desarrollado es un hallazgo positivo, no se puede soslayar el hecho de que deviene de una industria tremendamente depredadora, que lo ha acumulado por siglos, que seguramente buscará beneficio de sus propias faltas ambientales, y que esboza una pregunta: ¿cómo enfrentar la ética de la contaminación que beneficia mi propio modelo de producción?

Sin perjuicio de esto, es profundamente positivo, para la disciplina y la sociedad, encontrar usos al desecho de los grandes sistemas productivos, para incorporar sus flujos de materiales pasivos al metabolismo constructivo de las zonas aledañas, justamente, las más perjudicadas. Por ello, es prometedor observar que el relave tiene perspectivas hacia un fin constructivo en Chile, abriendo puertas futuras hacia tipos de manufacturas más sustentables.

5.2 Líneas futuras de investigación

Los resultados observados han levantado un conjunto de cuestionamientos que pueden organizarse en, al menos, dos líneas de investigación útiles para la arquitectura: el relave como material constructivo y la tecnología de impresión solar. Por ello, y a modo de recomendación para estudios futuros, estas conjeturas se desglosan a continuación.

Con respecto al material de relave:

- Los resultados, aunque auspiciosos, aún son muy poco concluyentes acerca de las posibilidades que este material puede ofrecer al campo de la construcción. Por lo mismo, deben ser tomadas como un primer esfuerzo de comprobación sobre su factibilidad de producción. Para identificar más cursos de aplicación, **nuevas pruebas** deben ser realizadas.
- El número de probetas ensayadas en este estudio fue muy limitado por el tiempo que consumía su fabricación. Se sugiere cumplir con el número de muestras que la INN exige. Para lograr este volumen de material, se vuelve necesario encontrar una **composición de agentes idónea**, que se encuentra en el rango de 60-30% para el relave, 40-20% para la arena y 35-25% para el agua.
- La adición de arena y agua fue usada debido a su facilidad de adquisición, así como a la experiencia con ensayos de fusión de arena del seminario. Sus propiedades, aunque determinantes para bajar el punto de fusión y lograr homogeneidad de tratamiento, no son exclusivas a ellos, por lo que un número muy amplio de **aglomerantes y fundentes** podría ser incorporado para próximos ensayos.
- La producción de **elementos granulares** utilizando sólo el relave y la luz solar concentrada, podrían tener una gran proyección en el campo de los materiales áridos para la construcción, sobre todo considerando su actual escasez. Por otro lado, es menester comprobar la ausencia de sulfatos oxidables, prohibidos por normativa, ya que son elementos que se encuentran en el relave, pero con puntos de ebullición muy bajos (45°C).
- Una incorporación parcial de áridos de relave podría resultar beneficiosa para otros sistemas de manufactura aditiva ligados a la construcción. Las técnicas que ocupan **extrusión de mezcla de morteros** son candidatos interesantes, en cuanto existe un creciente volumen de estudios que incorporan relave como material sustituto de arena o cemento, por lo que su intersección es posible.

Con respecto a la impresión solar:

- El valor de vincular las manufacturas digitales con una construcción en ambientes extremos está puesto en la necesidad de generar circuitos de producción locales de gran escala para aliviar a sectores afectados por relaves. Socializar estas perspectivas de construcción económica podría llevar a comunidades con grados de analfabetismo tecnológico, a dar saltos competitivos en cuanto a producción.
- De continuar con el mismo modelo Kayser, es necesario optimizar la flujo de energía entrante. Se divisan dos posibles estrategias: el colector solar debe incorporar un sistema tipo **obturador** que bloquee el paso de luz y que esté parametrizado para mantener un flujo ideal de irradiancia; los rayos incidentes deben ser captados por un dispositivo óptico que los canalice y **normalice** hacia la superficie contenedora del árido.
- Como pudo observarse en las distintas pruebas que incorporaron mezcla acuosa de áridos, es necesario que la energía traspasada a la cama de material no retorne libremente al ambiente, enfriándolo y ocasionando rupturas. Por ello, una **cámara térmica** se vuelve muy deseable.
- Otros modelos de impresión con Fresnel, no modulares, podrían reportar más beneficios para la materialización en entornos extremos: sistemas libres o ligeros, que podrían utilizar **soportes por poleas** para el lente de Fresnel sería ideal. Otra perspectiva que ayudaría a su desarrollo podría considerar fabricarlos en el país, ya que se pueden hacer con procesos industriales básicos, como el vaciado.
- Aunque la construcción de edificaciones mediante impresión solar es, todavía, una posibilidad lejana de apropiación material del espacio, puede perfilarse como un horizonte disciplinar que diverge en 3 áreas de interés: el desarrollo de sistemas de construcción sostenibles, la incorporación de desecho a gran escala como materia prima para nuevos materiales y el **asentamiento extraplanetario**.
- Finalmente, podría resultar de interés para el estudio de nuevas maneras de construir, la aplicación de mecanismos automatizados de concentración solar en otros ambientes extremos, ya sean nacionales o extranjeros. La **Antártida** se perfila como territorio de gran interés ya que, incluso cubierta por nubes, la débil luz del sol se potencia si se lleva a un punto focal.

BIBLIOGRAFÍA

Artículos, cartas, conferencias, papers & normativas

AHMARI, S. & ZHANG, L. (2011)

Production of eco-friendly bricks from copper mine tailings through geopolymerization. En "Construction and Building Materials" (vol.29), Amsterdam, Elsevier Science Ltd., p. 323.

BOULDING, K. E. (1966)

The Economics of the Coming Spaceship Earth. En "Environmental Quality in a Growing Economy", Baltimore, Johns Hopkins University Press, p. 3-4.

CARPO, M. (2007)

Sustainable? En "Log." (n°10), Nueva York, Anyone Corporation, pp. 19-21.

CERVANTES, G., SOSA, R., RODRÍGUEZ, G. & ROBLES, F. (2009)

Ecología industrial y desarrollo sustentable. En "Ingeniería" (vol.13, n°1), Mérida, Instituto Politécnico Nacional, pp. 4-5.

CHINDRIS, L., ARAD, V., ARAD, S., RADERMACHER, L. & RADEANU, L. (2017)

Valorization of Mining Waste in the Construction Industry - General Considerations. En "17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2017", Petroșani, University of Petroșani, pp. 1-5.

CHOI, Y., KIM, Y., CHOI, O., LEE, K. & LACHEMI, M. (2009)

Utilization of tailings from tungsten mine waste as a substitution material for cement. En "Construction and Building Materials" (vol.23), Amsterdam, Elsevier Science Ltd., p. 2481.

DAVIS, A., BUSH, R. C., HARVEY, J. C. & FOLEY, M. F. (2001)

Fresnel Lenses in Rear Projection Displays. En "SID - Symposium Digest of Technical Papers" (vol.32, n°1), Londres, Wiley Ltd., p. 934-937.

DAVIS, A. & KÜHNLENZ, F. (2007)

Optical Design using Fresnel Lenses: Basic Principles and some Practical Examples. En "Optik & Photonik" (vol.2, n°4), Weinheim, Wiley Ltd., p. 52-55.

DENG, H. (2012)

Experimental Research on Sintering Amorphous Based Material with Iron-tailings. En "Advanced Materials Research" (vol.535), Zurich, Trans Tech Publications, p. 722.

FALUDI, J., HU, Z., ALRASHED, S., BRAUNHOLZ, C. & KAUL, S. (2015)

Does Material Choice Drive Sustainability of 3D Printing? En "International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial and Mechatronics Engineering" (vol.9, n°2), Open Dartmouth: Faculty Open Access Articles, pp. 144-151.

INN (1972)

NCh771.Of1972. Arquitectura y construcción - Coordinación modular - Ladrillos cerámicos - Dimensiones modulares. Santiago, Instituto de normalización, pp. 1-2.

INN (2001)

NCh167.Of2001. Construcción - Ladrillos cerámicos - Ensayos. Santiago, Instituto de normalización, pp. 2-6.

INN (2001)

NCh791.Of2001. Construcción - Ladrillos cerámicos - Definiciones. Santiago, Instituto de normalización, p. 1.

INN (2003) (Mod.)

NCh2123.Of1997. Albañilería confinada - Requisitos de diseño y cálculo. Santiago, Instituto de normalización, pp. 28-29.

ISO (2010)

UNE-ISO 21930: 2010 (es). Sostenibilidad en la construcción de edificios - Declaración ambiental de productos de construcción. Ginebra, Organización Internacional de Normalización, pp. 7-10, 13-19.

ISO (2015)

ISO 14001: 2015 (es). Sistemas de gestión ambiental — Requisitos con orientación para su uso. Ginebra, Organización Internacional de Normalización, p. 9.

ISO (2016)

ISO 14004: 2016 (es). Sistemas de gestión ambiental — Directrices generales sobre la implementación. Ginebra, Organización Internacional de Normalización.

JIAN, S., YUAN, L., YANG, L., TAN, H., LI, X. & MA, B. (2011)

Study on Sintered Wall Materials Made Use of Iron Tailings and Waste Rock. En "Advanced Materials Research" (vol.243), Zurich, Trans Tech Publications, p. 7036.

JIAO, J., MA, Q. & TSENG, M. (2003)

Towards high value-added products and services: mass customization and beyond. En "Technovation" (vol.23, n°10), Amsterdam, Elsevier Science Ltd., pp. 809-810.

KARHU, M., LAGERBOM, J., SOLISMAA, S., HONKANEN, M., ISMAILOV, A., RÄISÄNEN, M., LEVÄNEN, E. & KIVIKYTÖ, P. (2018)

Mining tailings as raw materials for reaction-sintered aluminosilicate ceramics: effect of mineralogical composition on microstructure and properties. En "Ceramics International" (vol.45, n°4), Amsterdam, Elsevier Science Ltd., p. 4048.

KREIGER, M. & PEARCE, J. (2013)

Environmental Life Cycle Analysis of Distributed Three-Dimensional Printing and Conventional Manufacturing of Polymer Products. En "ACS Sustainable Chemistry & Engineering" (vol.1, n°12), Washington, ACS Publications, p. 1516.

LAMANI, S., MANGALPADY, A. & VARDHAN, H. (2016)

Utilisation of Mine Waste in the Construction Industry - A Critical Review. En "International Journal of Earth Sciences and Engineering" (vol.9, n°1), Hyderabad, Cafet-Innova, pp. 182-195.

LATHAM, J., CUMANI, R., ROSATI, I., & BLOISE, M. (2014)

Global Land Cover Share. En "Food and Agriculture Organization", ONU, p. 23.

MINVU (2006)

Manual de aplicación Reglamentación térmica. Santiago, Ministerio de Vivienda y Urbanismo.

MORRIS, C., DEBEAU, D., DRESSLER, A. & SEEPERSAD, C. C. (2017)

Multisystem Modeling and Optimization of Solar Sintering System. En "Solid Freeform Fabrication Symposium" de la XXVIII Conferencia Internacional Anual de Manufacturas Aditivas, The University of Texas, Austin, pp. 1400-1421.

OXMAN, N., KAYSER, M., KLEIN, J., STERN, N., DAVE, S., YANG, M. et al. (2015)
Additive Manufacturing of Optically Transparent Glass. En "3d Printing and Additive Manufacturing" (vol.2, n°3), Larchmont, Mary Ann Liebert Inc., p. 92-105.

PRADENA, M., CENDOYA, P. & BORKOWSKY, A. (2019)
Factibilidad técnica del uso de escorias de cobre como reemplazo de arena en morteros de pega de muros de albañilería. En "Tecnología en marcha" (vol.32, n°2), San José, Editorial Tecnológica de Costa Rica, pp. 100-101.

PICON, A. (2004)
Architecture & the Virtual: Towards a new Materiality. En "Praxis: Journal of Writing + Building" (n°6), Boston, Praxis Inc., pp. 114-121.

RANFANG, Z., GAOXIANG, D., LEFU, M. & WEIJUAN, G. (2012)
Preparation and Properties of Sintering Brick from Iron Tailings. En "Key Engineering Materials" (vol.512), Zurich, Trans Tech Publications, p. 1023.

SCHNEIDER, G., SCHLIPF, D. & STEPPER, R. (2014)
CSP Localization potential: Analysis and further potential for Chile. En informe para proyecto "Promoción de Energía Solar" implementado por Ministerio de Energía de Chile y la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit, Santiago, GIZ Ltd., p. 7-8.

ULLOA, A., PARADA, F., CARRASCO, J. C. & SÁNCHEZ, M. (2009)
Valorización de Pasivos Mineros: Caso relaves. En "Nueva minería y energía" (vol.1, n°7), Santiago, pp. 78-79.

Libros

ALONSO, P. (2012)
Deserta. Ecología e industria en el desierto de Atacama. Santiago, Ediciones ARQ, pp. 14-27, 292-294.

BOCKHEIM, J. G. (2014)
Soil Geography of the USA: A Diagnostic-Horizon Approach. Dordrecht, Springer, p. 9.

CARPO, M. (2013, Ed.)
The Digital Turn in Architecture 1992-2012. En colección AD Reader. Chichester, Wiley Ltd., pp. 8-14.

CARTER, B. & NORTON, G. (2013)
Ceramic Materials. Science and Engineering. Nueva York, Springer, pp. 3-4.

GIBSON, I., ROSEN, D. & STOCKER, B. (2015)
Additive Manufacturing Technologies. Segunda edición. Nueva York, Springer, pp. 63, 107, 147, 175, 205, 219, 245.

GRAEDEL, T. E. & ALLENBY, B. R. (1995)

Industrial Ecology. Nueva Jersey, Prentice Hall PTR, p. 2.

GROAT, L. & WANG, D. (2002)

Architectural Research Methods. Hoboken, Wiley Ltd. (2ª ed., 2013), p. 110, 227-229, 275-276, 288-294, 305-306, 315-319.

KULL, H. (2015)

Mass Customization Opportunities, Methods, and Challenges for Manufacturers. Nueva York, Apress Publishing, pp. 1, 41-42.

REID, A. & MAY, J. (2010)

Architettura senza architetti. Guida alle costruzioni spontanee di tutto il mondo. Milán, Rizzoli, pp. 6-7, 42-47, 170-183.

SHATOKHA, V. (Ed.) (2012)

Sintering: Methods and Products. Rijeka, InTech, p. 9.

WEISMAN, A. (2007)

The World Without Us. Nueva York, St. Martin's Press, p. 97.

Tesis, seminarios & prácticas profesionales

FRIEDMAN, D. (2017)

Sistema de concentración solar Fresnel para aplicaciones solares a escala comunitaria. Evaluación de prototipo. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Eléctrico, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile, p. 9-11.

MOLINA, J. (2016)

Desarrollo de un material compuesto basado en carozo de durazno y polipropileno para aplicaciones constructivas. Memoria para optar al título de Diseñadora industrial, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Chile, Santiago, Chile, pp. 4-6, 8.

MUÑOZ, L. (2019)

Valorización del carozo de durazno para el desarrollo de un material compuesto sostenible y su potencial aplicación. Memoria para optar al título de Diseñadora industrial, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Chile, Santiago, Chile, pp. 13, 19-22.

PARODI, D. (2016)

Desarrollo de un material compuesto biodegradable a partir de la utilización del residuo cáscara de nuez. Memoria para optar al título de Diseñadora industrial, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Chile, Santiago, Chile, pp. 17, 24-25.

RIETEMA, M. (2012)

Design of a Solar Sand Printer. Práctica profesional para el WOT - Working Group on Development Techniques. Facultad de Tecnología en Ingeniería, Universidad de Twente, Enschede, Países Bajos, p. 9-14.

VILLANUEVA, D. (2019)

Metodología de caracterización geoquímica de residuos mineros aplicable en faena. Memoria para optar al título de Ingeniero en Minas, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile, pp. 15-18.

WECHSLER, A. (2013)

Sustainable particleboards: Renewable building materials from agricultural and forestry by-products. Memoria para optar al título de Doctor en Diseño Industrial de Materiales Sustentables, Facultad de Entorno Construido, The University of New South Wales, Sydney, Australia, pp. 1-5.

Webs & multimedia

AMTC (2016)

Recuperación de elementos valiosos desde relaves. En “Proyectos del Centro Avanzado de Tecnología Minera de la Universidad de Chile”.

http://www.amtc.cl/?page_id=6923

BNC (2018)

El impacto ambiental de la minería en Chile. En “Memoria Chilena - Biblioteca Nacional”.

<http://www.memoriachilena.gob.cl/602/w3-article-3388.html>

DAVIS, J. (2018)

How much does space travel cost? En “Mach-Science - NBC”.

<https://www.nbcnews.com/mach/science/how-much-does-space-travel-cost-ncna919011>

ELERT, G. (1998)

Thermal Physics y Waves & Optics. En “The Physics Hypertextbook”.

<https://physics.info/heat-latent/> y <https://physics.info/heat-sensible/>

ESTURILLO, J. (2019)

Gobierno detecta 37 relaves mineros abandonados que presentan peligro para la población y el ambiente. En “Economía y Negocios”.

<http://www.economiaynegocios.cl/noticias/noticias.asp?id=543587>

ETHERINGTON, R. (2011)

The Solar Sinter by Markus Kayser. En “Show RCA 2011 de Dezeen Magazine”.

<https://www.dezeen.com/2011/06/28/the-solar-sinter-by-markus-kayser/>

KAYSER, M. (2012)

Solar Sinter. En “Meetings of Minds”, TEDxGhent, Ghent University, Gante, Bélgica.

<https://www.youtube.com/watch?v=FZTsWEfnqtg&index=14&list=PL5276EEF24DEE081F&t>

KAYSER, M. (2013)

Can There Be Union between Nature and Technology in Fabrication?. En “SVA MA Design Research - Vimeo”.

<https://vimeo.com/60130365>

KIRK, A. & MORRIS, H. (2017)

Mapped: The countries with the most volcanoes. En “Travel - The Telegraph”.

<https://www.telegraph.co.uk/travel/maps-and-graphics/mapped-the-worlds-most-dangerousvolcanoes/>

MERRIAM-WEBSTER (2019)

Research & Development. En diccionario digital “Merriam-Webster”.

<https://www.merriam-webster.com/dictionary/research%20and%20development>

NASA (2015)

Garbage Patch Visualization Experiment. En “NASA - Scientific Visualization Studio”.
<https://svs.gsfc.nasa.gov/4174>

NTKJ (2019)

Fresnel lens product catalog. En Nihon Tokushu Kogaku Jushi Co., Ltd.
https://www.ntkj.co.jp/product_fresnel_en.html

OECD (2017)

Main Science and Technology Indicators. En “OECD Publishing”.
<https://data.oecd.org/rd/gross-domestic-spending-on-r-d.htm>

OWEN, D. (2017)

The World Is Running Out of Sand. En “The New Yorker”.
<https://www.newyorker.com/magazine/2017/05/29/the-world-is-running-out-of-sand>

RAE (2019)

Extremo, ma. En “Diccionario de la Real Academia Española”.
<https://dle.rae.es/?id=HQ7BTGT>

SERNAGEOMIN (2020)

Geoquímica de Superficie de Depósitos de Relaves de Chile 2020. En “Datos Públicos Depósito de Relaves”, Santiago, Servicio Nacional de Geología y Minería, p. 2.
<https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2020/01/Registro-Geoquímico-de-Depósitos-Relaves-en-Chile-actualizaciónEnero-2020.pdf>

GLOSARIO SOLAR

Calor latente

Cantidad de energía térmica requerida para producir una transición de fase de primer orden en un cuerpo, a presión y temperatura constante. El calor liberado o absorbido proviene de la energía potencial almacenada en los enlaces entre partículas y no de su movimiento. Se define por el producto entre masa por calor latente específico (L) y se expresa en kilojulios.

$$Q_l = m \cdot L = \text{kg} \cdot (\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}) = \text{kJ}$$

Calor sensible

Cantidad de energía térmica requerida para elevar en una unidad de temperatura la masa de un cuerpo a presión constante. Se define por el producto entre la masa por la capacidad calórica específica (Cp) por la variación de temperatura y se expresa en kilojulios.

$$Q_s = \text{kg} \cdot (\text{J} \cdot [\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}]^{-1}) \cdot (^\circ\text{C}_f - ^\circ\text{C}_i) = \text{kJ}$$

Ecuaciones de Fresnel

Describen la transmisión de luz, o radiación electromagnética en general, cuando incide en una interfaz entre medios con diferentes índices de refracción, donde una parte de la onda pasa al otro medio y otra parte rebota. La relación entre los ángulos de los rayos resultantes queda determinada por la ley de reflexión y la ley de Snell.

Eficiencia de transmisión óptica

Tasa de energía, en longitud de onda corta, que llega al receptor, dividida por la energía proveniente del recurso solar. Permite encontrar el número de anillos ideal para la eficiencia de colección. Las pérdidas pueden ocasionarse por difusión, reflexión y calidad de fabricación.

$$\eta = \Phi_2 \cdot \Phi_1^{-1}$$

Energía termosolar de concentración (CSP)

Sistema de energía térmica proveniente del sol que utiliza medios ópticos para concentrar la luz solar en superficies acotadas. La energía eléctrica se produce al convertir luz concentrada en calor, impulsando un motor térmico conectado a un generador de electricidad. Difiere de la Energía fotovoltaica de concentración (CPV), donde la luz solar es transformada en calor mediante efecto fotoeléctrico.

Fusión y sinterización selectiva por láser (SLM y SLS)

Técnicas de prototipado, impresión 3D o fabricación aditiva diseñadas para usar un láser de alta densidad de potencia para fundir o adherir polvos, ya sean polímeros o metálicos, mediante superposición de capas. Son similares, difiriendo en el acabado. El SLM funde completamente el polvo metálico en una forma tridimensional sólida. El SLS, por su parte, requiere usualmente de procesos posteriores debido a su limitada capacidad de fusión del material granulado.

Ley de Snell

Fórmula que describe relación entre ángulos de incidencia y refracción, referida a ondas que pasan por un límite entre dos medios isotrópicos diferentes. Establece que la proporción de los senos de los ángulos de incidencia y refracción es igual a la relación de las velocidades de fase en los dos medios, o equivalente al recíproco de la relación de los índices de refracción.

$$\sin\theta_i \cdot (\sin\theta_r)^{-1} = v_i \cdot v_r^{-1} = n_r \cdot n_i^{-1}$$

Irradiación

Integración o suma de las irradiancias en un período de tiempo. Expresa cantidad de energía a generar. Se mide en julios por metro cuadrado por hora, día, semana, mes, año, etc.

$$I = J \cdot t \cdot m^{-2}$$

Irradiancia

Potencia o radiación incidente por unidad de superficie. Indica la intensidad de la radiación solar. Se mide en vatios por metro cuadrado.

$$E = W \cdot m^{-2}$$

Julio o joule

Unidad de energía, de símbolo J, equivalente al trabajo realizado sobre un objeto cuando una fuerza de un Newton actúa sobre el mismo en la dirección del movimiento de la fuerza a través de una distancia de un metro. También puede definirse como el producto entre vatios por segundo. Es utilizada para medir trabajo y calor.

$$J = kg \cdot m^2 \cdot s^{-2} = W \cdot s$$

Número f

Es la relación entre la distancia focal del lente (f) con su diámetro de apertura efectiva (ϕ), y también se la conoce como la “velocidad” del lente. Cuanto más bajo sea el número f , más rápido será el lente y cuanto más alto sea el número f , más lento será el lente. Según Leutz, un Fresnel de $f/0.5$ (diámetro dos veces mayor que longitud focal) se vuelve menos práctico.

$$f/\# = f \cdot \phi^{-1}$$

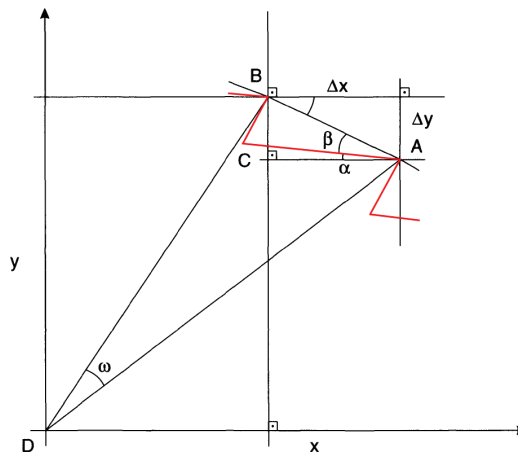
Pascal

Unidad de presión que ejerce una fuerza de un Newton sobre un área de un metro cuadrado normal a la misma. Equivale a un kilogramo por el producto de un metro por un segundo cuadrado.

$$\text{Pa} = \text{N} \cdot \text{m}^{-2} = \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$$

Pitch del lente de Fresnel

Distancia proyectada del ancho de los prismas inclinados de los anillos concéntricos del Fresnel hacia su plano. Definida mediante trigonometría por ángulo ω , que divide la apertura del lente en segmentos iguales, la inclinación del prisma α y el ángulo del prisma β .



Radiación horizontal difusa (DHI)

Cantidad de radiación recibida por unidad de área por una superficie de manera no directa desde el sol, lo que dispersa el espectro electromagnético en la atmósfera, generando pérdidas.

Radiación horizontal global (GHI)

Cantidad total de radiación de onda corta recibida sobre una superficie horizontal al suelo. Es igual a la suma de la Radiación Difusa Horizontal con el producto de la Radiación Normal Directa por el coseno del ángulo cenital solar. Es de particular interés para las instalaciones fotovoltaicas.

$$\mathbf{GHI = DNI \cdot \cos(\theta) + DHI}$$

Radiación solar directa (DNI)

Cantidad de radiación solar recibida por unidad de área por una superficie de manera perpendicular o normal. Es especialmente utilizada por instalaciones que rastrean la posición del sol.

Temperatura

Cantidad escalar que denota el flujo de energía calórica entre dos sistemas. Dos regiones en contacto térmico tienen la misma temperatura cuando no hay intercambio neto de energía interna entre ellas. Se mide con un termómetro calibrado en una o más escalas.

Transferencia de calor

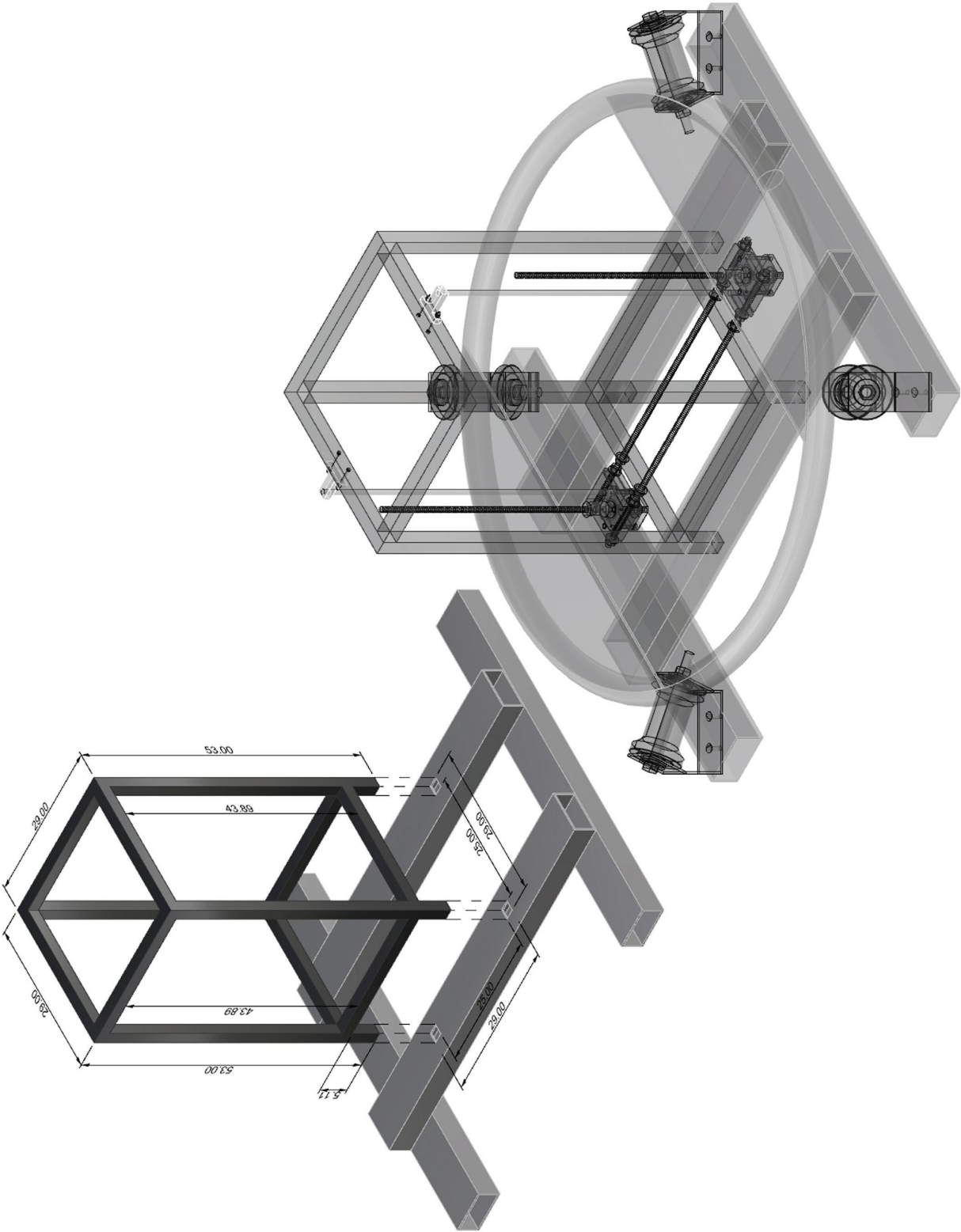
Intercambio de energía potencial interna entre sistemas físicos. Se produce de 3 maneras: por conducción, a través de contacto directo entre partículas; por convección, a través de un fluido o diferencia de presión; y por radiación, a través de cambios en la configuración electrónica de átomos o moléculas constitutivas en contacto con ondas electromagnéticas.

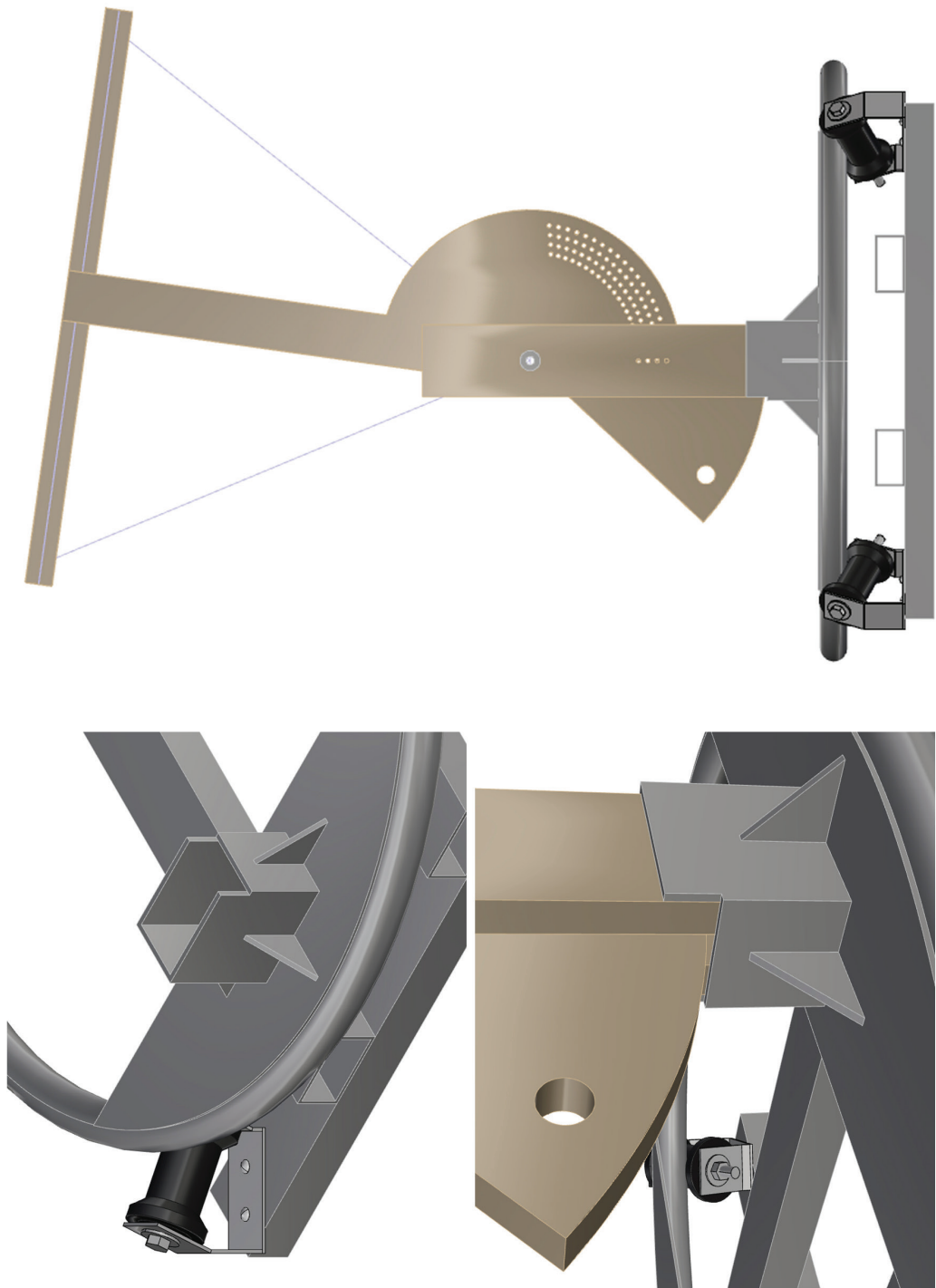
Vatio o watt

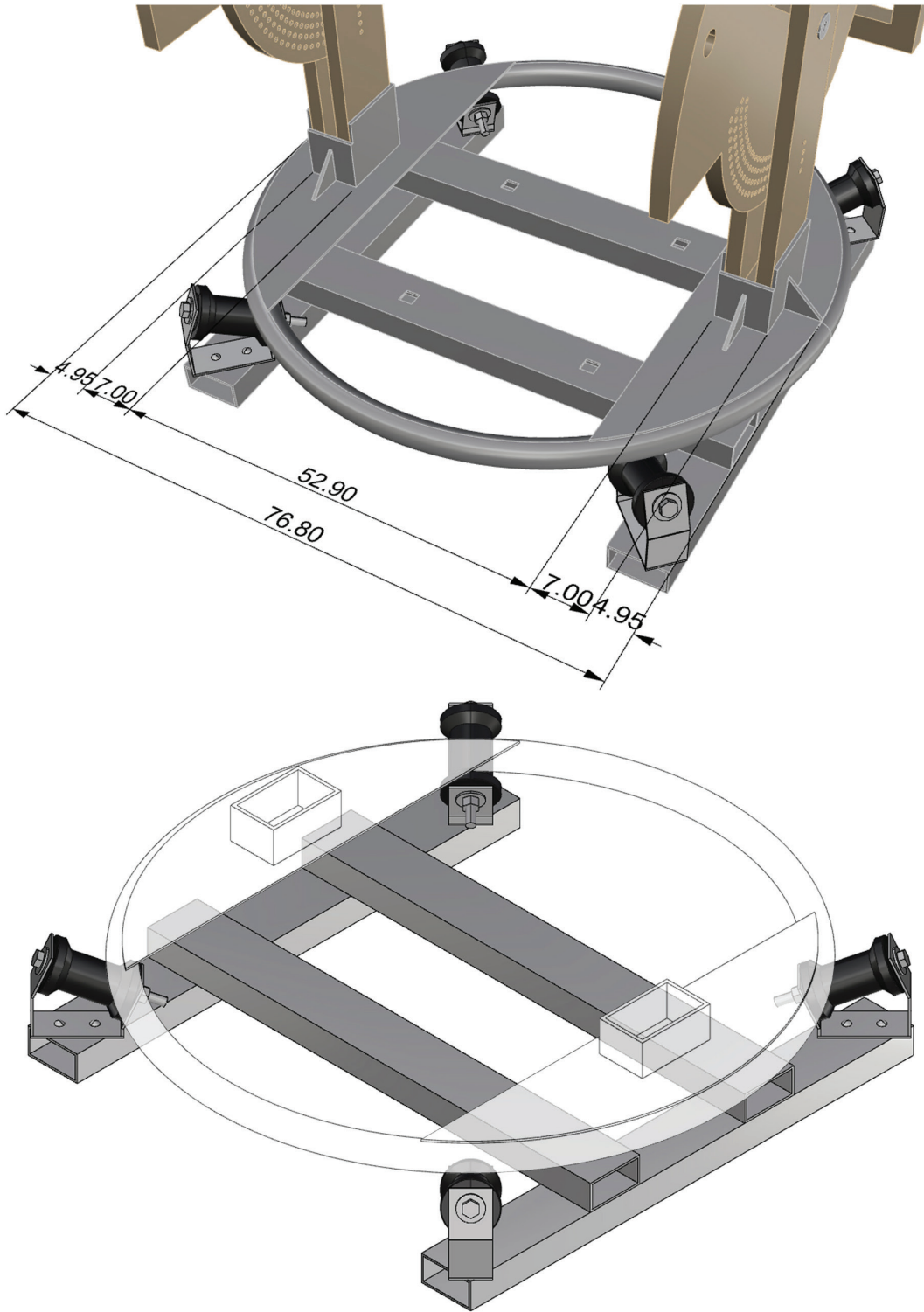
Unidad de potencia, de símbolo W, definida como un julio por segundo, utilizada para cuantificar la tasa de transferencia de energía. Puede aplicarse a cualquier tipo de potencia, sea esta mecánica, eléctrica, magnética, acústica, etc.

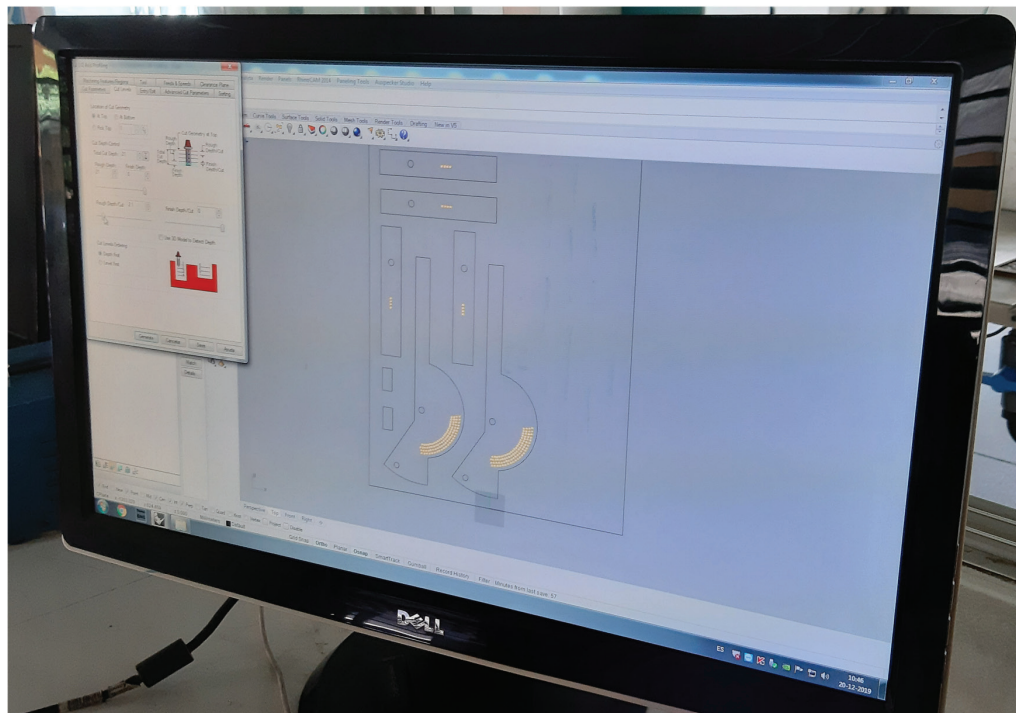
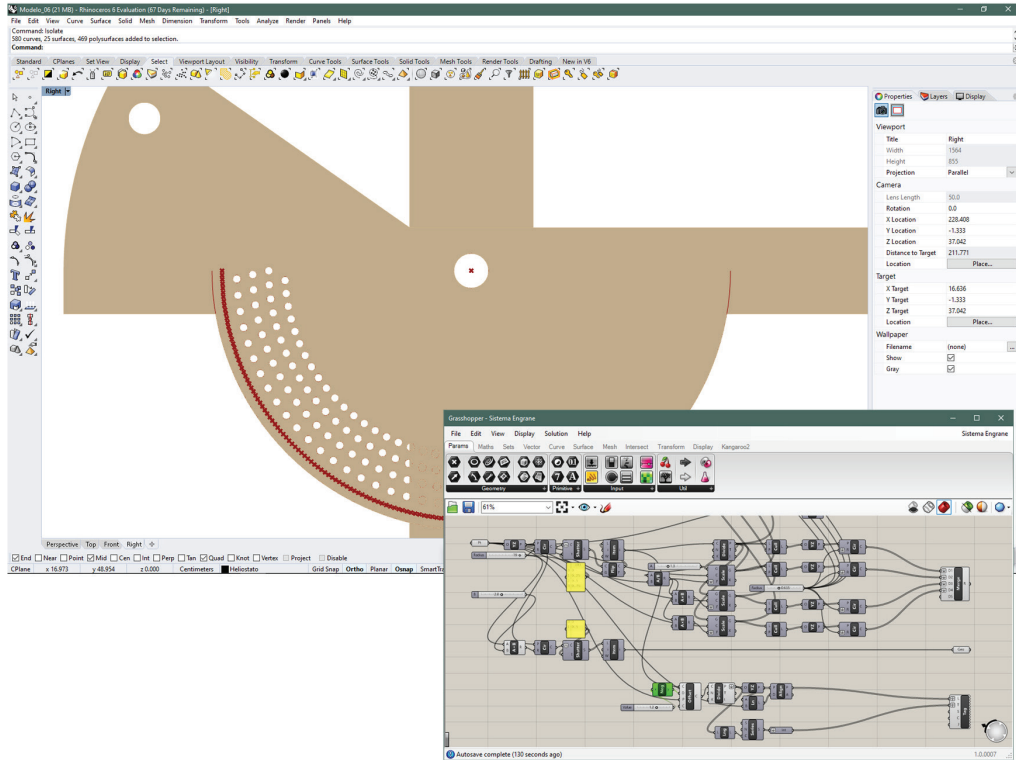
$$\mathbf{W = J \cdot s^{-1}}$$

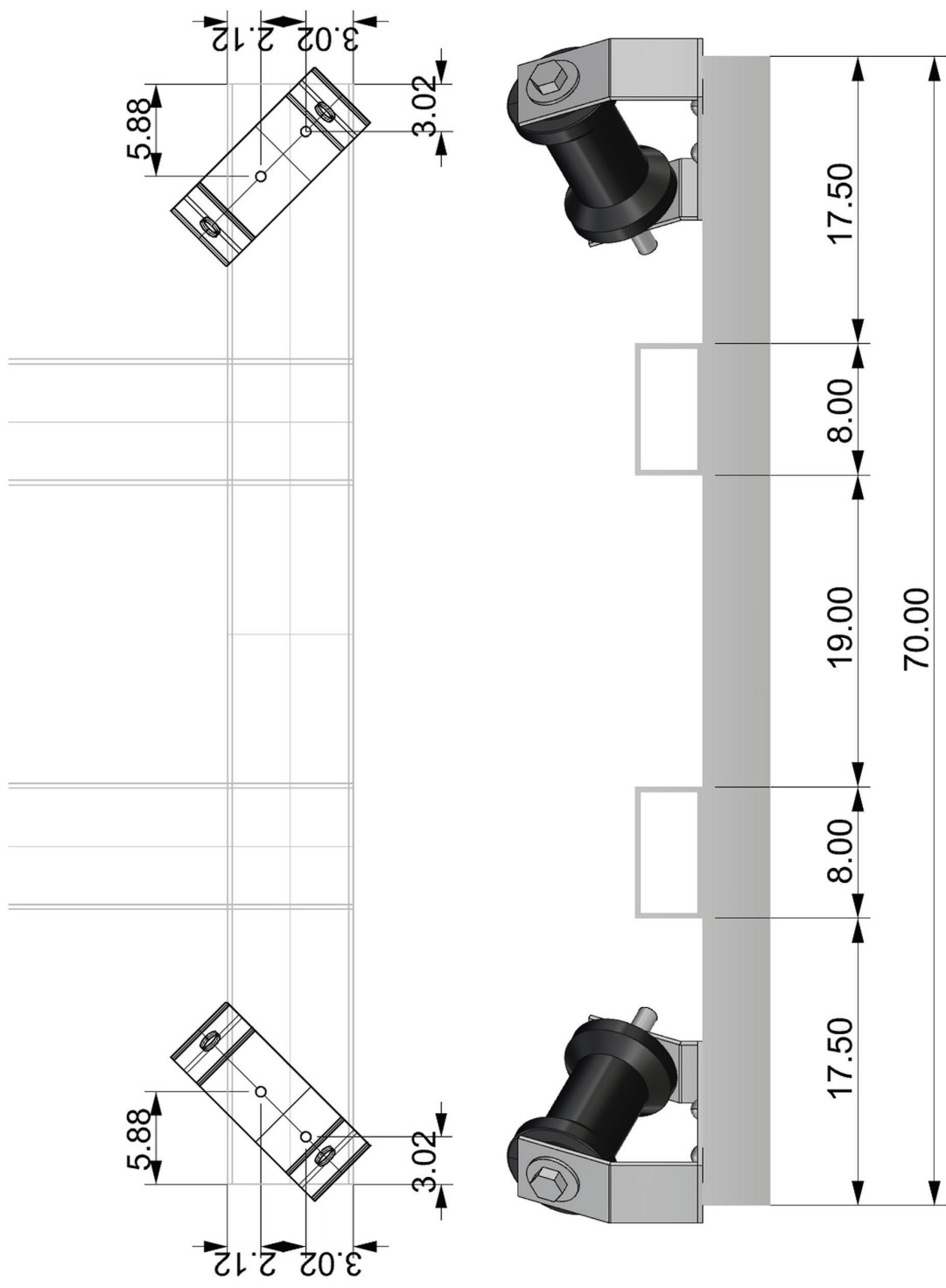
ANEXO A - DOCUMENTOS MECANIZADO

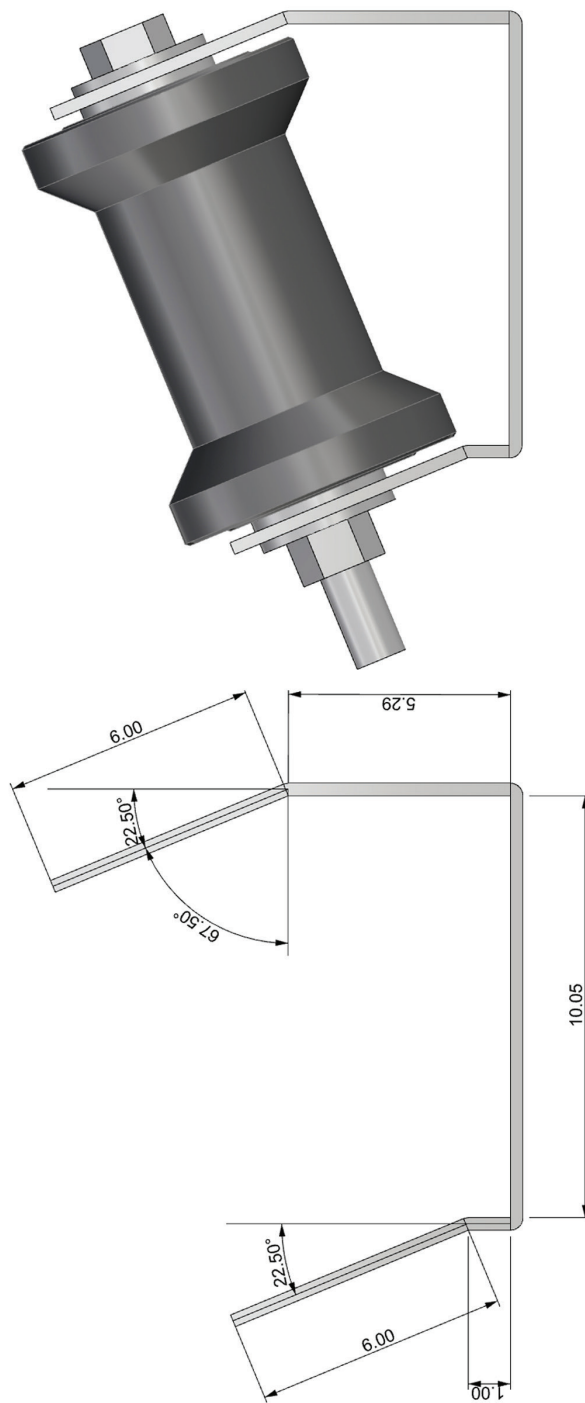
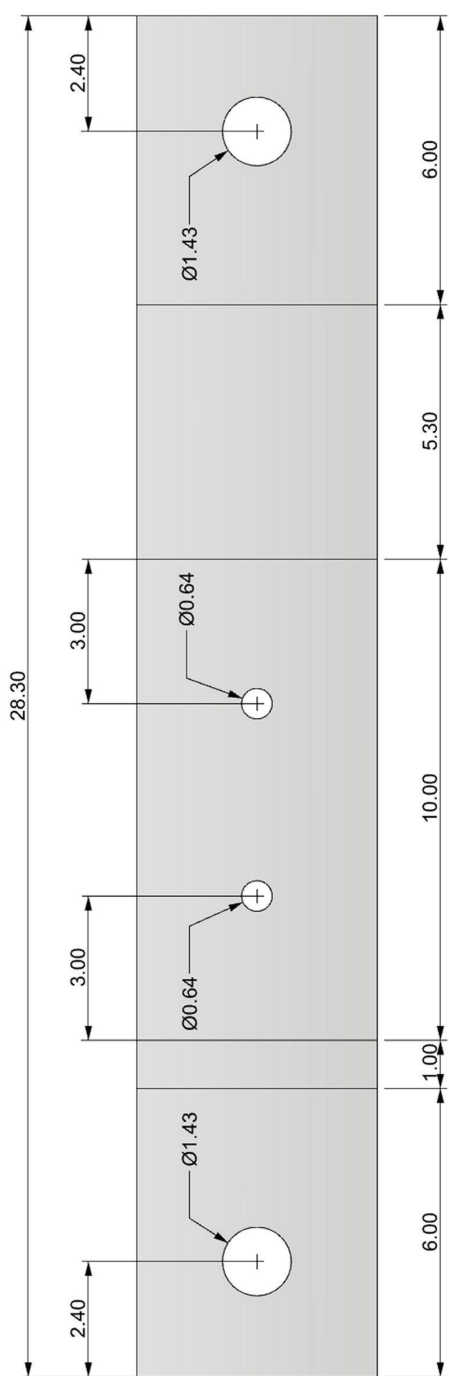


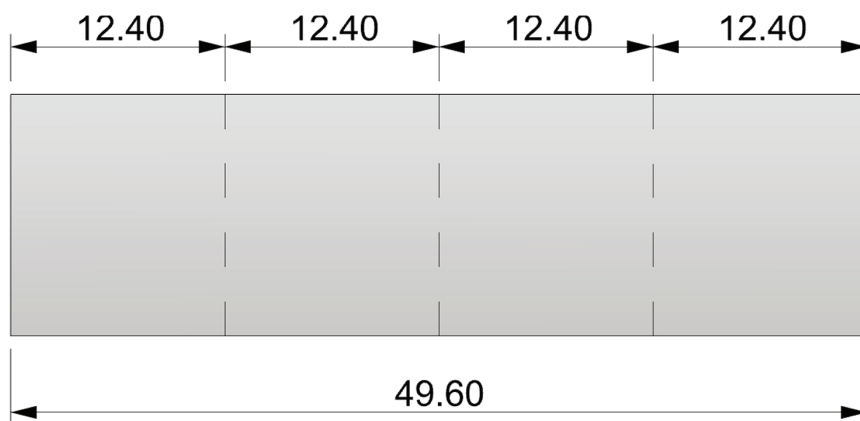
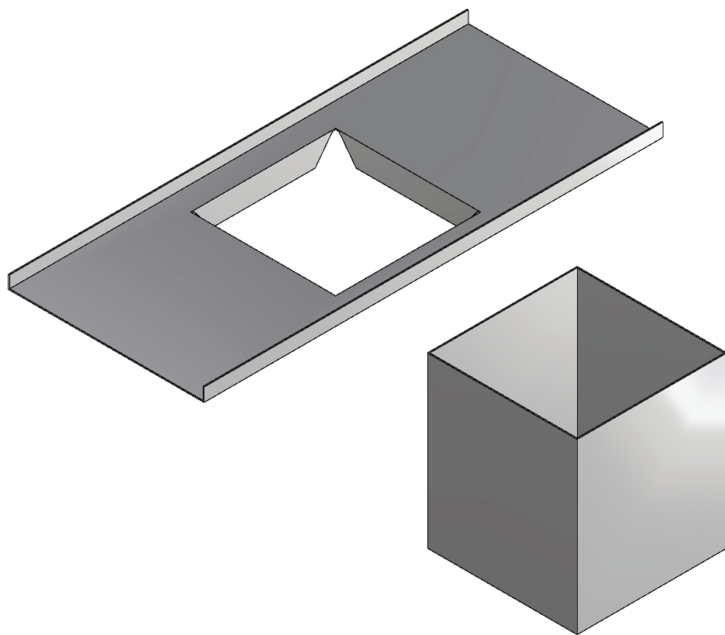
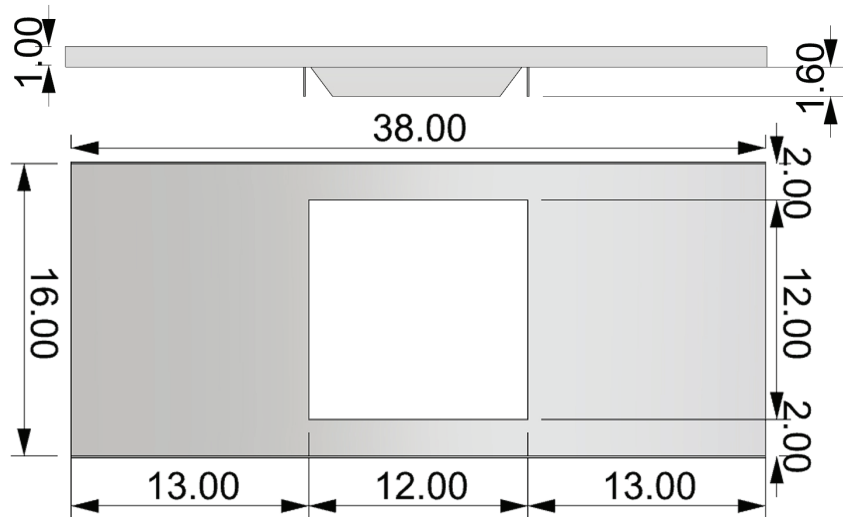


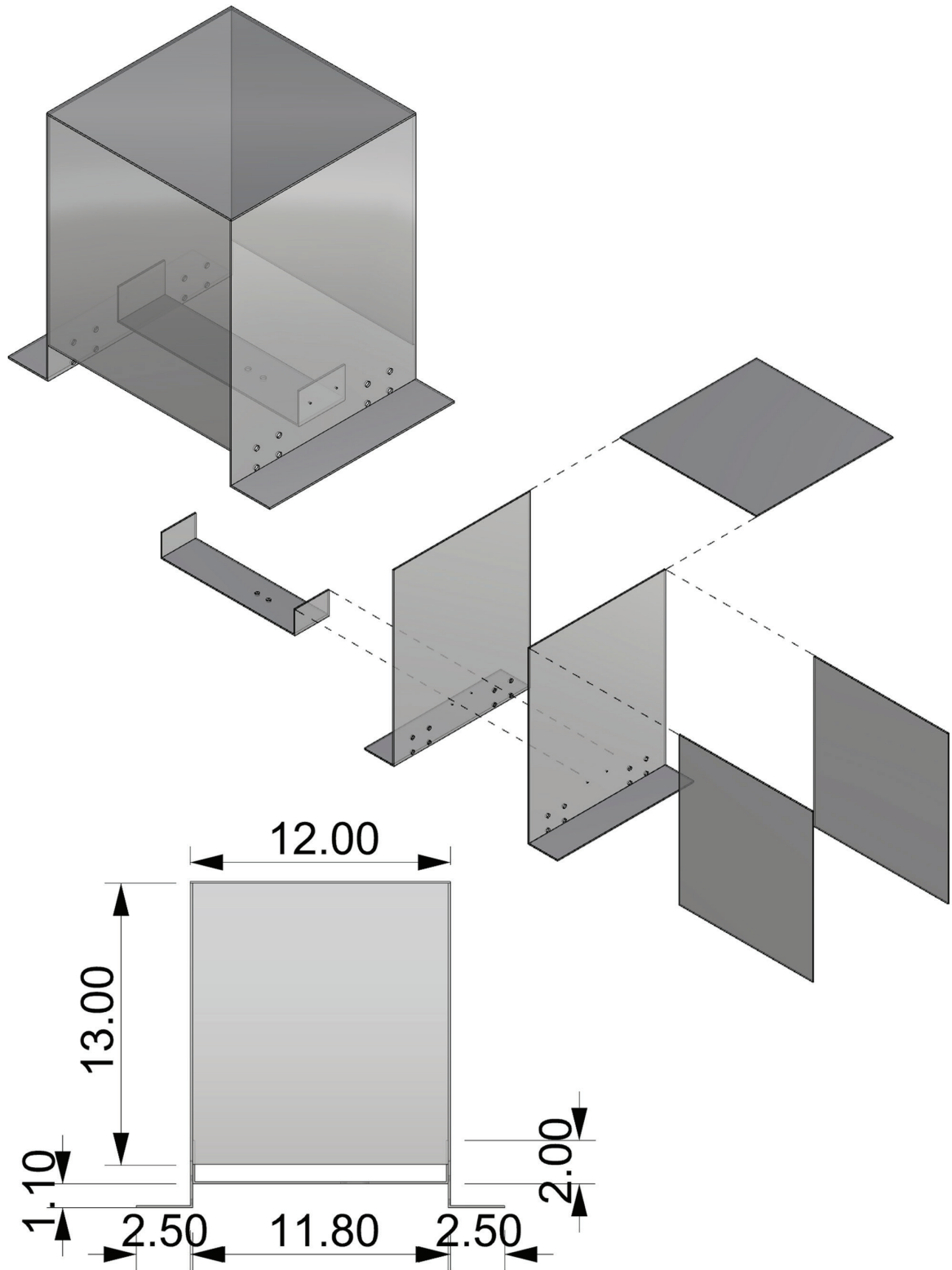












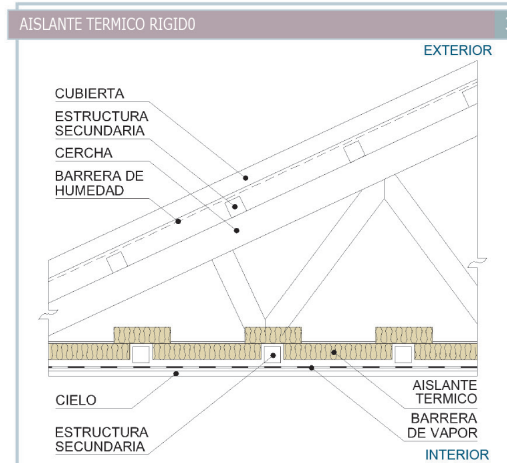
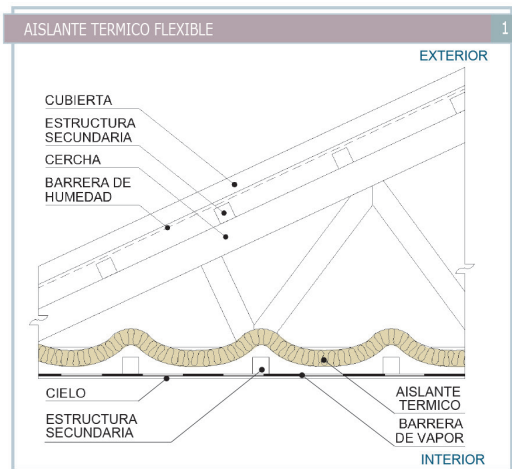
ANEXO B - SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS GENÉRICAS

TECHUMBRE

SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS DE TECHUMBRE

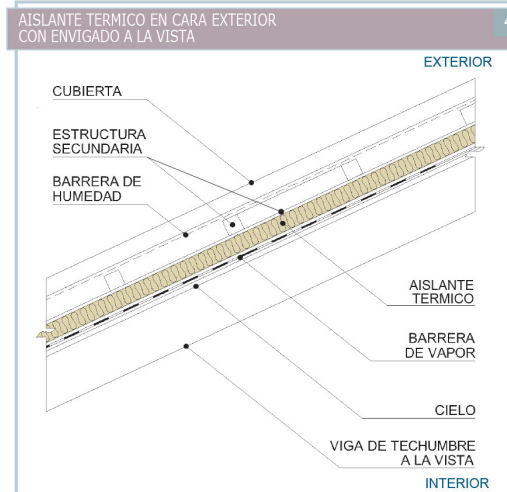
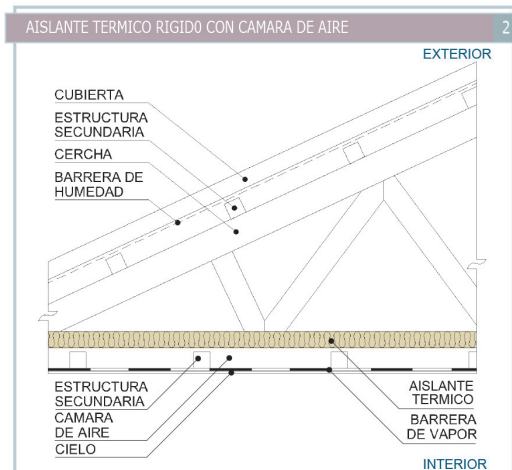
a) Techumbres con cercha:

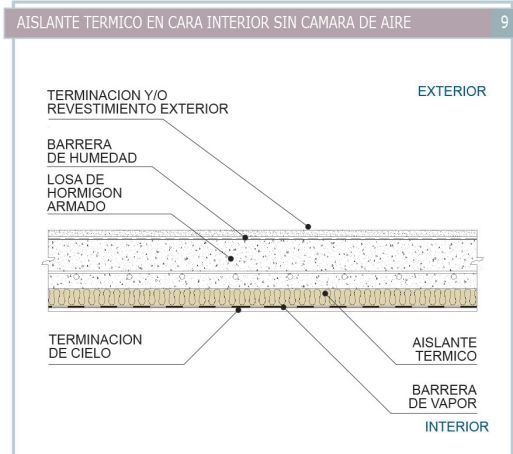
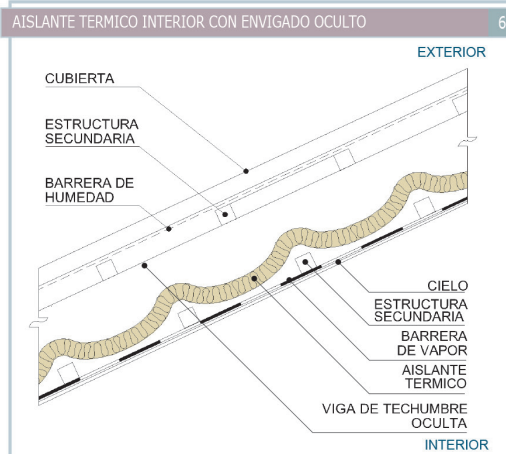
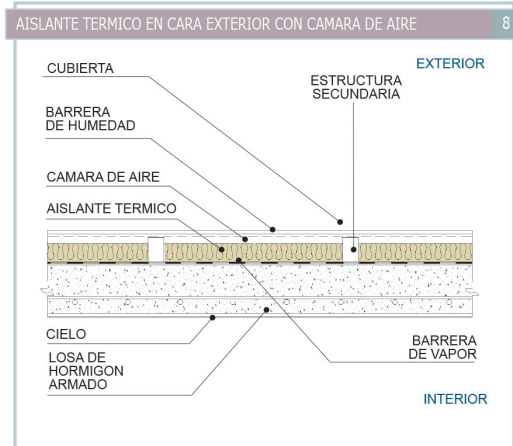
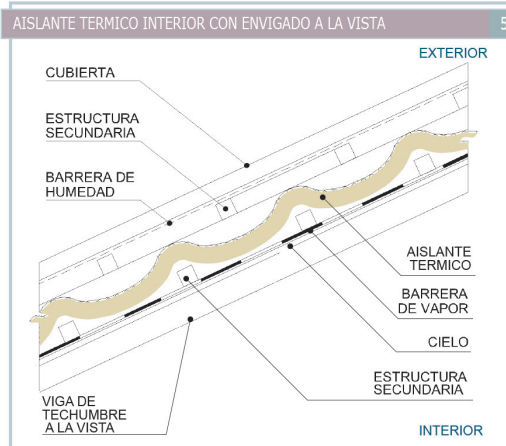
Corresponde a todas aquellas techumbres que utilizan cerchas metálicas o de madera para estructurar la techumbre.



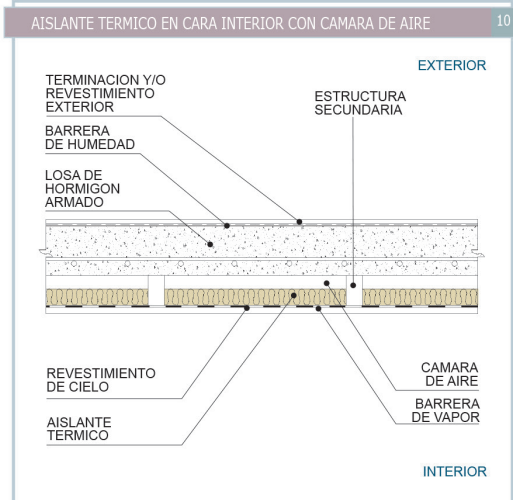
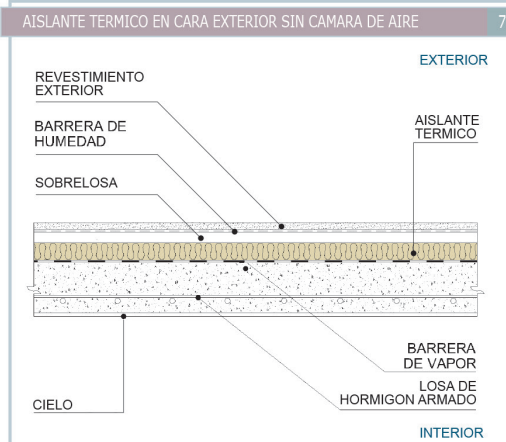
b) Techumbres con vigas:

Corresponde a las techumbres que utilizan vigas de madera o metálicas para estructurar la techumbre.





c) Techumbres con losas

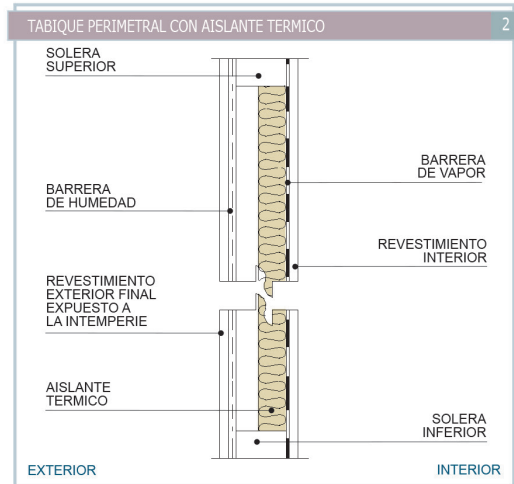
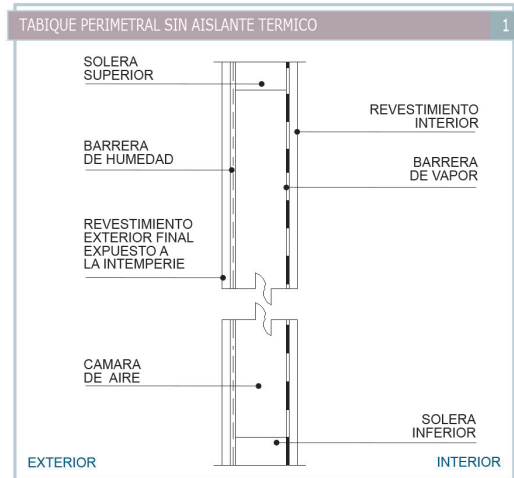


MUROS

SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS DE MUROS

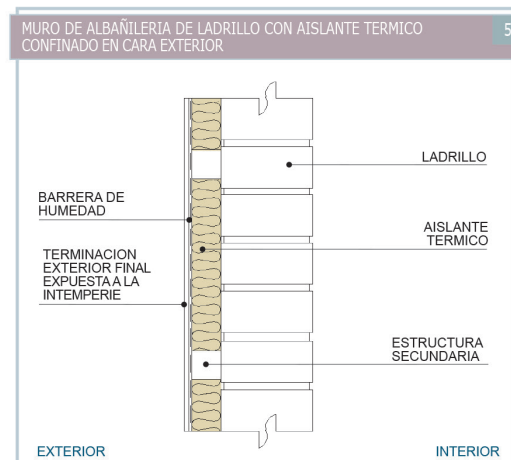
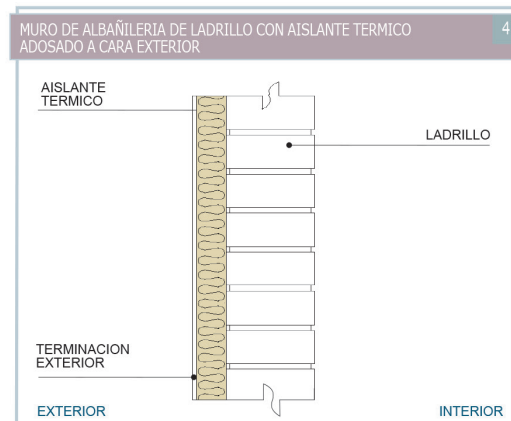
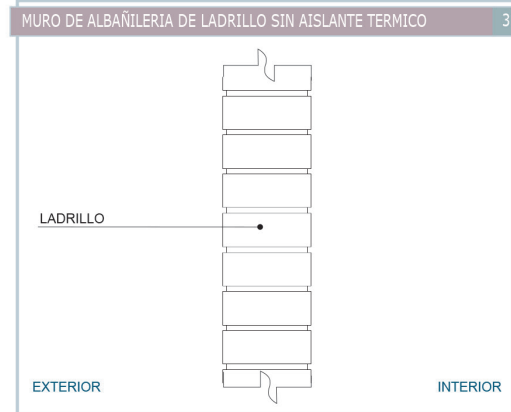
a) Tabiques perimetrales

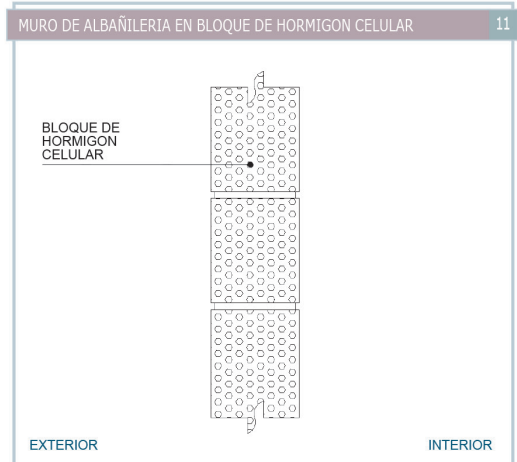
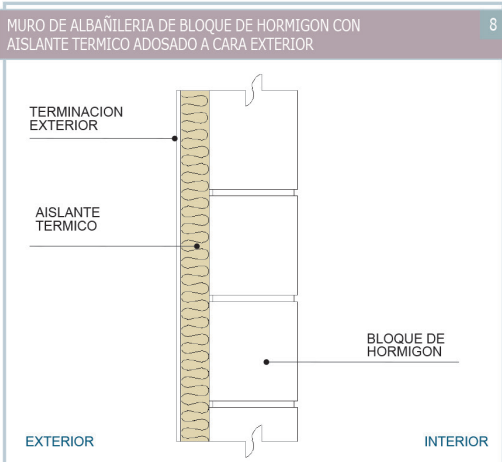
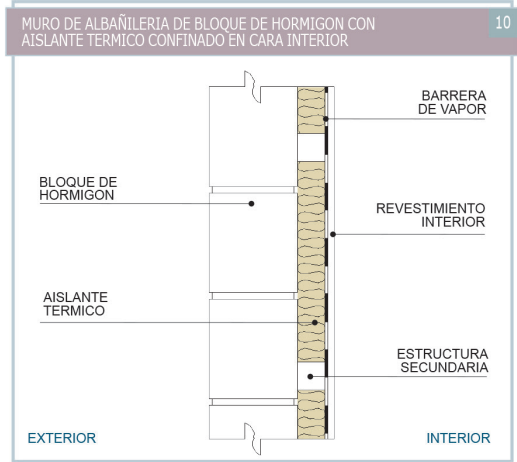
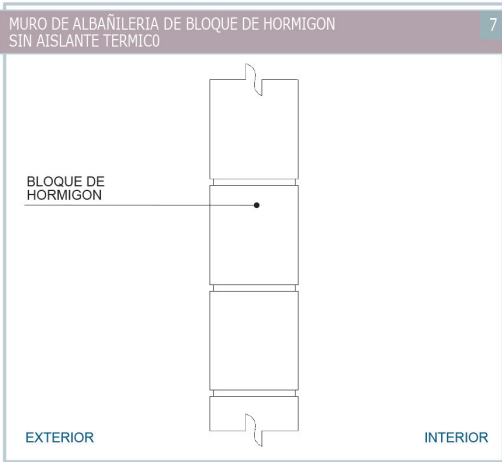
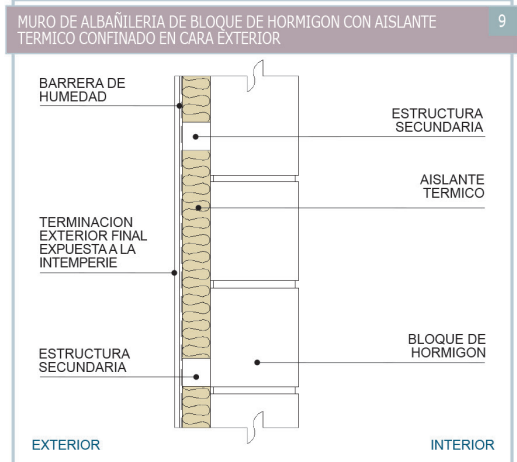
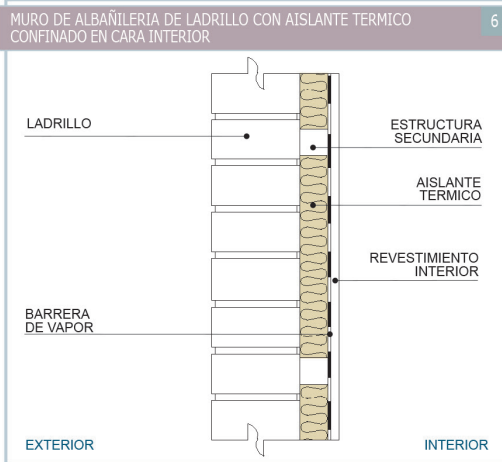
Corresponde a todos aquellos muros soportantes o no soportantes estructurados en base a sistemas de entramados metálicos o de madera.

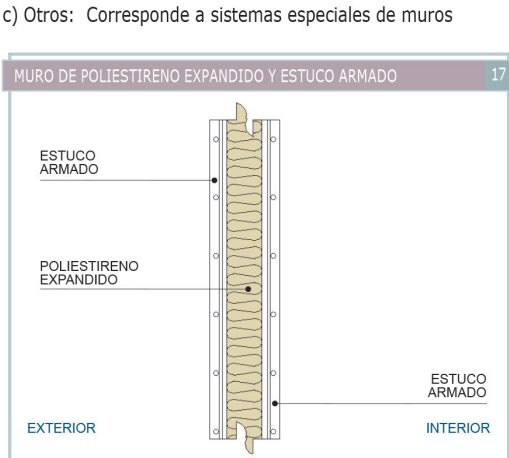
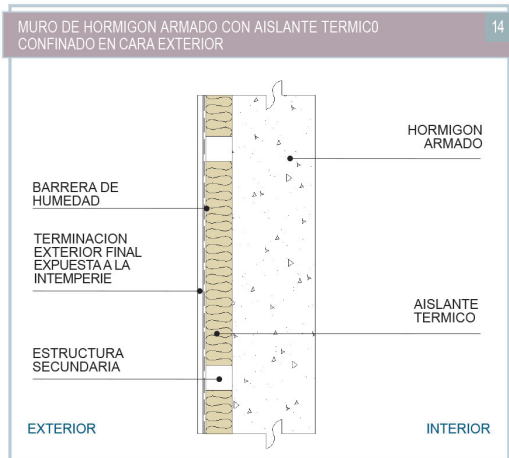
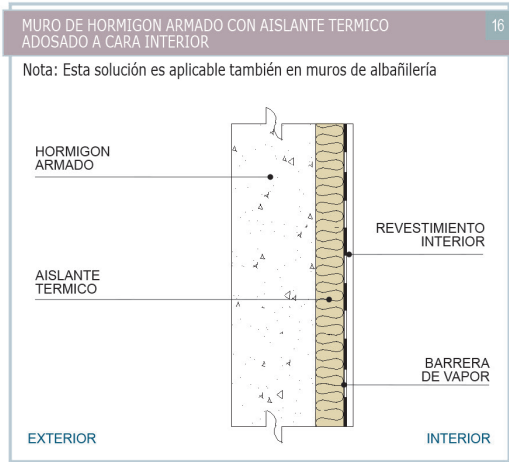
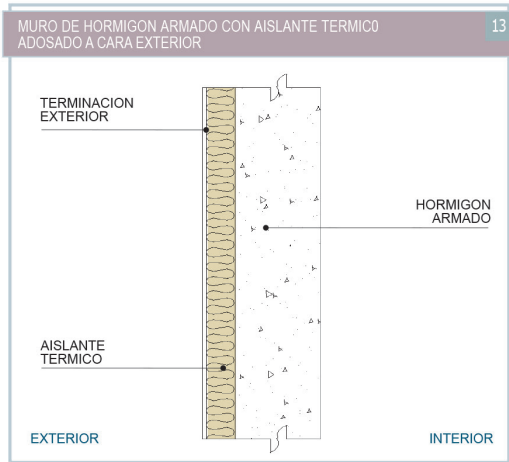
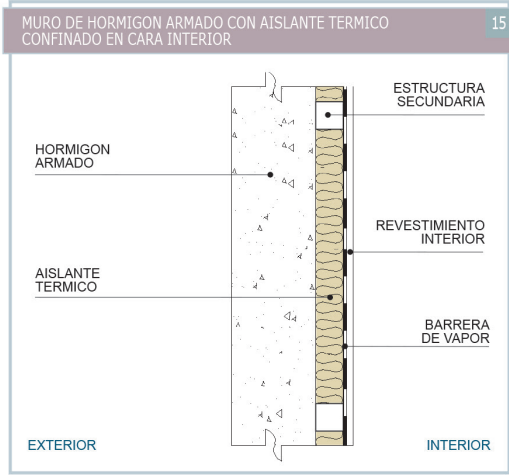
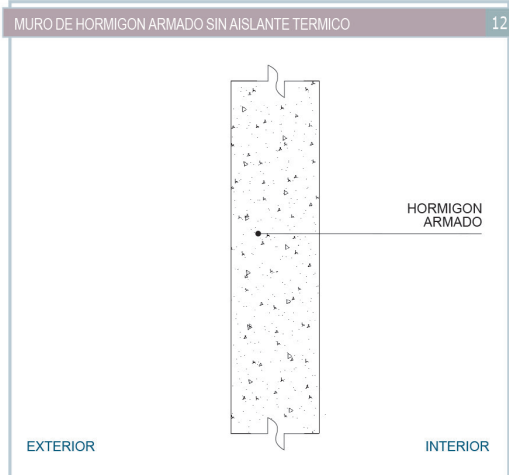


b) Muros de hormigón y albañilería

Corresponde a todos aquellos sistemas de muros construidos de hormigón armado o albañilería de ladrillo o bloques de hormigón.







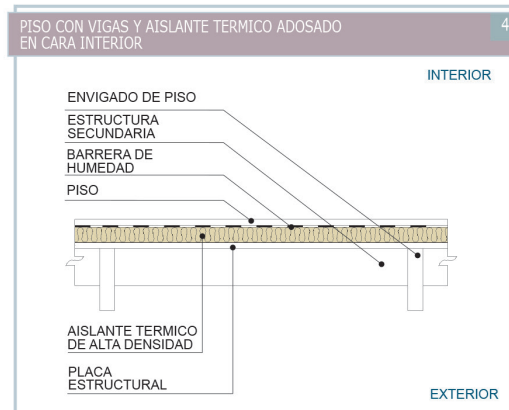
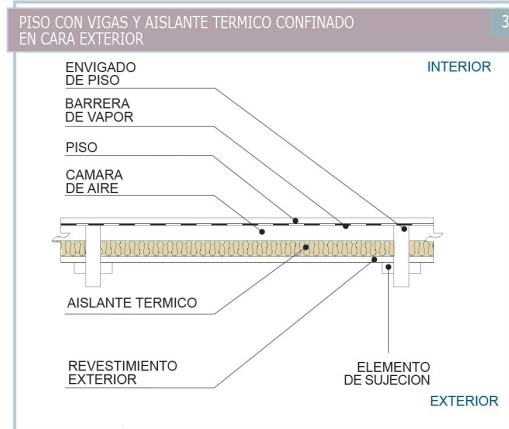
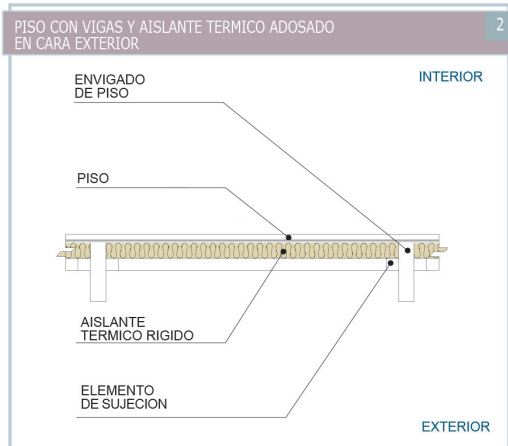
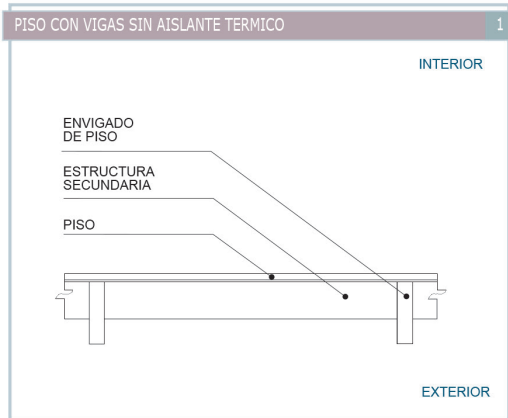
c) Otros: Corresponde a sistemas especiales de muros

PISOS

SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS DE PISOS VENTILADOS

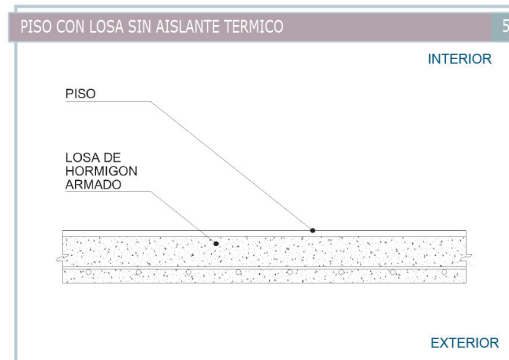
a) Pisos con entramados

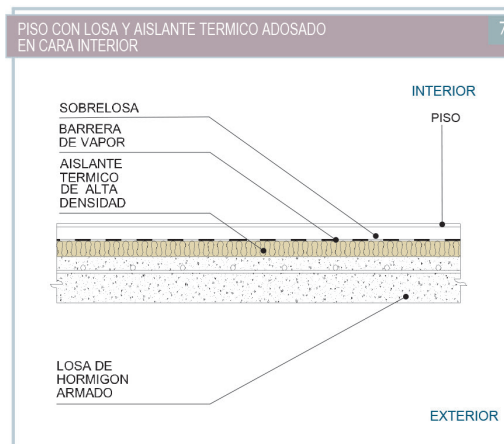
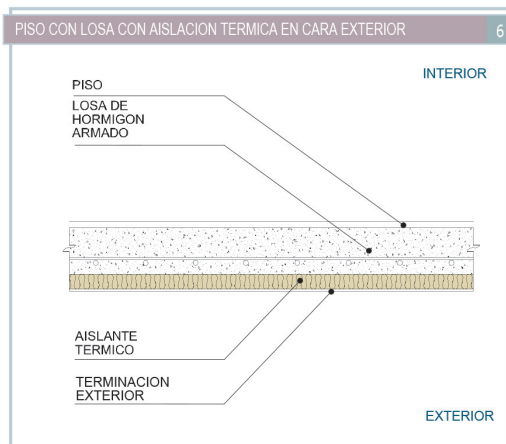
Corresponde a todos aquellos pisos estructurados con sistemas de vigas.



b) Pisos con losas

Corresponde a todos aquellos pisos contruidos con losas de hormigón armado.





ESPESOR REFERENCIAL DEL MATERIAL AISLANTE TERMICO PARA LAS SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS DE PISOS (mm)

	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Zona 7
R 100							
Poliestireno expandido 10 kg/m ³	20	45	55	65	80	105	130
Lana de vidrio 11 kg/m ³	30	50	60	80	80	100	130
Poliuretano rígido 40 kg/m ³	6	25	33	39	47	62	77
Piso 1							
Espeor de piso= 25mm							
Piso sin aislante térmico	aplicable	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica
Pisos 2 y 4							
Piso + aislante térmico							
Poliestireno expandido 15 kg/m ³	0	25	40	50	60	85	110
Piso 3							
Piso + aislante térmico							
Poliestireno expandido 10 kg/m ³	0	30	40	50	65	90	115
Lana de vidrio 11 kg/m ³	0	30	40	50	80	100	130
Poliuretano rígido 40 kg/m ³	0	18	25	32	40	55	70
Piso 5							
Espeor de losa de HA= 120 mm							
Losa sin aislante térmico	aplicable	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica
Piso 6							
Espeor de losa de HA= 120 mm							
Poliestireno expandido 15 kg/m ³	0	40	45	55	70	95	120
Piso 7							
Espeor de losa de HA= 120 mm							
Poliestireno expandido 15 kg/m ³	0	40	45	55	70	95	120
Lana de vidrio 18 kg/m ³	0	40	50	60	80	100	120
Poliuretano rígido 40 kg/m ³	0	22	30	36	45	59	74

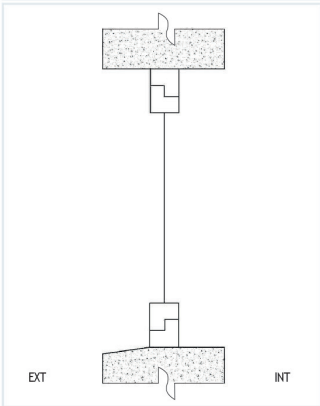

Notas:

1. Los espesores de aislante térmico han sido adaptados a los espesores de los productos existentes en el mercado.
2. Las densidades del material aislante térmico son referenciales y se deben determinar según los requerimientos específicos de la solución constructiva.
3. Para la determinar los espesores de aislante térmico en las soluciones constructivas se consideró solamente la resistencia térmica del material aislante, la resistencia térmica del material que soporta al aislante y la resistencia térmica de las capas de aire superficial interior y exterior.

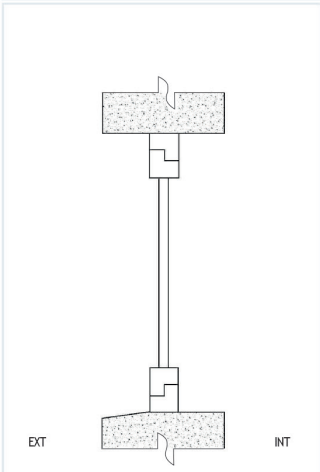
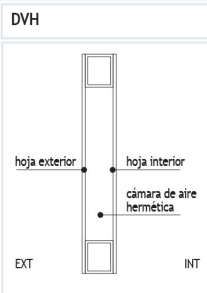
VENTANAS

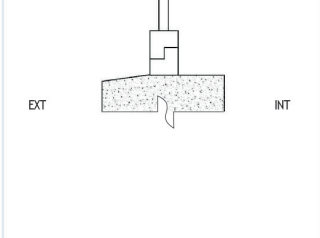
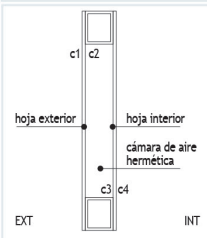
1. Ventanas

Los vidriados más frecuentes existentes en el mercado se detallan en la siguiente tabla:

Ventana vidriado simple		ESPESOR (mm)		Valor U (W/m ² K)	
		Hoja			
	Vidriado simple 	3	5,8		
		4	5,8		
		5	5,8		
		6	5,7		
		7	5,7		
		8	5,7		
		9	5,6		
		10	5,6		

Nota: el valor U de los cristales de color, reflectivos o vidrios de seguridad (templados o laminados) se puede asimilar al de los cristales monolíticos incoloros de igual espesor.

Ventana doble vidriado hermético (DVH)		ESPESOR (mm)				Valor U (W/m ² K)	
		Hoja exterior	Cámara aire	Hoja interior	Esesor total		
	DVH 	3	10	3	16	3,1	
		5	10	5	20	3,1	
		6	10	6	22	3,1	
		3	12	3	18	2,8	
		4	12	4	20	2,8	
		5	12	5	22	2,8	
		6	12	6	24	2,8	

DVH de baja emisividad		ESPESOR (mm)				Valor U (W/m ² K)	
		Hoja exterior	Cámara aire	Hoja interior	Esesor total		
	DVH de baja emisividad 	3	12	3	18	1,8	
		4	12	4	20	1,8	
		5	12	5	22	1,8	
		6	12	6	24	1,8	

Nota: superficie de baja emisividad se ubica en cara 3 (c3).