

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE ARQUITECTURA

VALPARAÍSO – CHILE



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO TÉRMICO EN MUROS DE HORMIGÓN IMPRESOS EN 3D

LUCAS MOISÉS VALENZUELA DROGUETT

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE ARQUITECTO

NINA HORMAZABAL POBLETE – PABLO SILLS GARRIDO

DICIEMBRE 2023



Análisis del Desempeño Térmico en Muros de Hormigón Impresos en 3D

PROYECTO I+D

Advertencia: Material de referencia, su uso no involucra responsabilidad del autor o de la institución. [06]

Agradecimientos

Agradezco en este proceso a mis profesores referentes Verónica, Pablo y Nina, en sus consejos, correcciones, enseñanzas y aliento. Al personal de Sika que aportó al desarrollo de este trabajo, a Hugo y Emmanuel por la compañía en el proceso.

Dedicatoria

Dedico esta memoria a mi familia, mis padres Juan y Fedora, que están siempre apoyando los desafíos que me pongo por delante y me dan los ánimos para poder concretar las metas que tengo en mente, y a Valentina que siempre te das tiempo para escuchar, entender y comprender las complicaciones, mis mañas, y el cariño incondicional que me das.

RESUMEN

Debido a la elevada conductividad térmica del hormigón, las edificaciones presentan un consumo elevado de energía para climatizarlas, requiriendo mayores espesores de su envolvente por los elementos aislantes adicionales a incorporar.

La presente memoria bajo la modalidad de Investigación + Desarrollo (I+D), se enfoca en analizar el desempeño térmico de muros de hormigón impreso en 3D para la edificación, detallando el exhaustivo proceso de experimentación y cálculo llevado a cabo en esta investigación aplicada.

El desarrollo de muros usando herramientas de diseño digitales puede optimizar la cantidad de radiación solar incidente en la fachada, contener cámaras de aire estanco y dar paso al uso de aislante en las cavidades del muro, sin requerir de elementos adicionales una vez concluida la impresión, reduciendo tanto desperdicios de una obra tradicional como el volumen de material necesario para dimensiones similares.

A partir de la libertad formal de la impresión 3D, la investigación contempla el modelado de prototipos a escala que permitan evaluar la capacidad de generar cavidades al interior de los muros y patrones de fachada que proyecten sombra sobre sí misma.

Se evaluarán los porcentajes de radiación solar incidente por fachadas y valor de transmitancia térmica de cada muro desarrollado según parámetros climáticos de tres localidades de Chile, estableciendo comparativas con su similar en construcción tradicional de hormigón armado y reportando los resultados de las impresiones, analizando las posibilidades de estandarizar el desempeño térmico del sistema.

Esta investigación dará cuenta de las mejoras que establece la impresión 3D y de sus cualidades térmicas, abriendo campos de investigación como la incorporación de fachadas ventiladas, disminución de puentes térmicos, sistemas constructivos escalables, entre otros.

Palabras clave: Desempeño Térmico, Impresión 3D en Hormigón, Construcción Industrializada.

ABSTRACT

Due to the high thermal conductivity of concrete, buildings have a high consumption of energy to improve condition, requiring greater thicknesses of their envelope due to the additional insulating elements to be incorporated.

The present report under the Research & Development (R+D) modality focuses on analyzing the thermal performance of 3D printed concrete walls for buildings, detailing the exhaustive experimental and calculation process carried out in this applied research.

The development of digital walls can optimize the amount of incident solar radiation on the facade, contain sealed air chambers and give way to the use of insulation in the concavities of the wall, without requiring additional elements once the printing is finished, reducing both waste of a traditional work as the volume of material needed for similar dimensions.

Based on the formal freedom of 3D printing, the research contemplates the modeling of scale prototypes that allow evaluating the ability to generate concavities inside the walls and facade patterns that cast a shadow on itself.

The percentages of incident solar radiation by facades and thermal transmittance value of each wall developed according to climatic parameters of three locations in Chile that will be evaluated, establishing comparisons with their simile in traditional reinforced concrete construction and reporting the results of the impressions. Exploring possibilities for standardizing the thermal performance of the system.

This research will account for the improvements established by 3D printing and its thermal qualities, opening research fields such as the incorporation of ventilated facades, reduction of thermal bridges, among others.

Keywords: Thermal Performance, 3D Printing in Concrete, Industrialized Construction.

GLOSARIO

- **Conductividad térmica de diseño:** Valor de conductividad térmica de un material o producto para la edificación bajo condiciones exteriores e interiores específicas que pueden considerarse como típicas del desempeño de ese material o producto cuando es incorporado a un componente de la edificación, expresado en $W/(m \times K)$. [FUENTE: NCh853:2021]
- **Confort térmico:** Son las condiciones necesarias según la zona climática para satisfacer necesidades de temperie al interior de una edificación.
- **Diseño pasivo:** Diseño de un proyecto de arquitectura basado en estrategias climáticas del lugar en el que esta inserta la obra, buscando aprovechar los recursos del contexto para lograr el máximo confort de sus ocupantes.
- **Envolvente del edificio:** Corresponde a los elementos de cerramiento de una edificación, son sus pisos, muros y techumbre, también se incluyen sus elementos operables: puertas y ventanas. Dichos elementos son los que se utilizan para el análisis climático de un proyecto, dejando expresados los recintos o elementos adiabáticos.
- **Resistencia térmica de diseño:** Valor de resistencia térmica de un producto de la edificación bajo condiciones exteriores e interiores que pueden considerarse como típicas del desempeño de ese material o producto cuando es incorporado a un componente de la edificación, expresado en $m^2 \times K/W$. [FUENTE: NCh853:2021]
- **Transmitancia térmica:** Se define como el flujo de calor que pasa por unidad de superficie del elemento y por grado de diferencia de temperaturas entre dos ambientes separados por dicho elemento, expresado en $W/(m^2 \times K)$.
- **Impresión 3D:** Conjunto de procesos que elaboran objetos por la adición de material por trayectorias, la cual define el recorrido de un modelo 3D, o por capas las que corresponden a sucesivas secciones transversales de un modelo 3D.

ÍNDICE

RESUMEN	3
ABSTRACT	4
GLOSARIO	5
INTRODUCCIÓN.....	14
ANTECEDENTES.....	15
CAPÍTULO 1. Marco Teórico.....	18
Pregunta de Investigación.....	18
Hipótesis.....	18
Metodología.....	19
CAPÍTULO 2. Desarrollo Prototipos de Muro.....	22
2.1. Información Técnica Impresión	45
2.1.1. Características técnicas del proceso de impresión.....	49
2.1.2. Características Técnicas de Modelos Impresos.....	49
2.2. Análisis Resultados.....	50
CAPÍTULO 3. Desempeño Térmico de Muros Impresos en 3D	51
3.1. Transmitancia Térmica.....	53
3.1.1. Análisis Resultados.....	66
3.1.2. Comparativa Desempeño Térmico.....	68

3.2. Información Climática Ciudades	70
Antofagasta.....	71
Concepción.....	79
Esquema radiación global directa.....	83
Recomendaciones de diseño.....	84
3.3. Auto Sombreado en Muros	86
Zona Térmica A - Antofagasta.....	88
Zona Térmica D – Santiago	96
Zona Térmica E – Concepción.....	104
CAPÍTULO 4. Resultados y Discusiones	113
CAPITULO 5. Conclusiones	115
REFERENCIAS.....	117

Índice de figuras

Figura 1. Proyecto vivienda impresa "TOVA" de IAAC. Fuente: IAAC.....	17
Figura 2. Esquema de la secuencia investigativa. (Elaboración propia).	19
Figura 3. Esquema procedimiento impresión 3d. (Elaboración propia).	20
Figura 4. Esquema evaluación climática. (Elaboración propia).....	21
Figura 5. Fotografía resultado modelo impreso día 4.....	24
Figura 6. Modelo 3d proyectado versus altura lograda de impresión.	25
Figura 7. Fotografía resultado modelo impreso día 6.....	25
Figura 8. Imagen de pantalla configuración de modelo en Simplify 3D.	26
Figura 9. Previsualización de impresión y rangos de velocidad modelo Simplify 3D.	26
Figura 10. Fotografías modelos impresos resultantes día 7, medición de largo y alto modelo C.	27
Figura 11. Fotografía cenital modelo impreso día 8, muestra del grosor cordón de impresión y cavidades del muro.....	28
Figura 12. Fotografía prototipo impreso día 9.	29
Figura 13. Fotografía prototipo impreso día 9.	29
Figura 14. Fotografía proceso de impresión 3D modelo A día 10.	31
Figura 15. Fotografía resultado impresión modelo A.	31
Figura 16. Fotografía frontal resultado impresión modelo C.....	32
Figura 17. Fotografía cenital resultado impresión modelo C.	32
Figura 18. Fotografía resultado modelo de impresión día 11.....	33
Figura 19. Fotografía del proceso de impresión modelo día 11.....	33
Figura 20. Modelo A día 12, resultado de protocolo 3D.	34
Figura 21. Fotografía resultado impresión día 12.....	34
Figura 22. Modelo B día 12, Resultado protocolo Grasshopper.	35

Figura 23. Fotografía resultado impresión modelo B día 12, detalle en uso de fibras zona inferior derecha.	35
Figura 24. Fotografía resultado impresión modelo C día 12, detalle en uso de fibras zona inferior derecha.	36
Figura 25. Modelo C día 12, desarrollo protocolo Grasshopper.	36
Figura 26. Modelo A día 13, Desarrollo protocolo Grasshopper.	37
Figura 27. Fotografía resultado impresión modelo A día 13.	37
Figura 28. Modelo B día 13, modelo realizado en Grasshopper.	38
Figura 29. Fotografía resultado impresión modelo B día 13.	38
Figura 30. Fotografía resultado impresión modelo C día 13.	39
Figura 31. Modelo C día 13, modelo realizado en Grasshopper.	39
Figura 32. Fotografía resultado impresión modelo A día 14.	40
Figura 33. Modelo A día 14, modelo realizado en Grasshopper, detalle composición de 4 paneles.	40
Figura 34. Modelo B día 14, modelo realizado en Grasshopper, detalle composición de 4 paneles.	41
Figura 35. Fotografía resultado impresión modelo B día 14.	41
Figura 36. Modelo A día 15, modelo realizado en Grasshopper, variación de escala y uso de 2 paneles.	42
Figura 37. Fotografía resultado impresión modelo A día 15.	42
Figura 38. Modelo A día 15, modelo realizado en Grasshopper.	43
Figura 39. Fotografía cuerpo de extrusor de impresora tapada.	43
Figura 40. Fotografía resultado impresión modelo A día 16.	43
Figura 41. Fotografía resultado impresión modelo A día 17.	44
Figura 42. Modelo A día 17, modelo realizado en Grasshopper, detalle composición de 4 paneles más variación de escala.	44
Figura 43. Esquema para el análisis térmico. (Elaboración propia).	52
Figura 44. Sección del muro para cálculo de la transmitancia térmica. (Elaboración propia).	55

Figura 45. Sección de los elementos componentes del muro. (Elaboración propia).....	55
Figura 46. Imagen y secciones del muro MA_D9_2906 para el cálculo de Transmitancia Térmica.....	57
Figura 47. Imagen y secciones del muro MA_D12_2707 para el cálculo de Transmitancia Térmica.....	58
Figura 48. Imagen y secciones del muro MB_D12_2707 para el cálculo de Transmitancia Térmica.....	59
Figura 49. Imagen y secciones del muro MD_D13_0208 para el cálculo de Transmitancia Térmica.....	60
Figura 50. Imagen y secciones del muro ME_D13_0208 para el cálculo de Transmitancia Térmica.....	61
Figura 51. Imagen y secciones del muro MA_D14_1108 para el cálculo de Transmitancia Térmica.....	62
Figura 52. Imagen y secciones del muro MB_D14_1108 para el cálculo de Transmitancia Térmica.....	63
Figura 53. Imagen y secciones del muro MA_D16_0109 para el cálculo de Transmitancia Térmica.....	64
Figura 54. Imagen y secciones del muro MB_D17_0809 para el cálculo de Transmitancia Térmica.....	65
Figura 55. Comparativas de transmitancia térmica entre muros impresos 3D y muro de construcción tradicional.....	69
Figura 56. Esquema información climática. (Elaboración propia).	70
Figura 57. Imágenes de pantalla, asoleamiento en solsticios y equinoccios de la ciudad de Antofagasta, Chile. Periodos diciembre a junio y diciembre a junio. Generadas a partir del software Climate Consultant 6.....	71
Figura 58. Gráfico de radiación global horizontal anual en la ciudad de Antofagasta, Chile. Generados a partir del software Climate Consultant 6.	72
Figura 59. Imágenes de pantalla de gráficos 3D de radiación global horizontal de la ciudad de Antofagasta, Chile. Izquierda AndrewMarsh, derecha Climate Consultant 6.	73
Figura 60. Secciones de gráfico de radiación solar, mañana, medio día y tarde en la ciudad de Antofagasta, Chile. 28 febrero. Imagen de pantalla extraída de AndrewMarsh.	73
Figura 61. Secciones de gráfico de radiación solar, mañana, medio día y tarde en la ciudad de Antofagasta, Chile. 21 junio. Imagen de pantalla extraída de AndrewMarsh.	74

Figura 62. Secciones de gráfico de radiación solar, mañana, medio día y tarde en la ciudad de Antofagasta, Chile. 21 septiembre. Imagen de pantalla extraída de AndrewMarsh.	74
Figura 63. Imágenes de pantalla, asoleamiento en solsticios y equinoccios de la ciudad de Santiago, Chile. Periodos diciembre a junio y diciembre a junio. Generadas a partir del software Climate Consultant 6.	75
Figura 64. Gráfico de radiación global horizontal anual en la ciudad de Santiago, Chile. Generados a partir del software Climate Consultant 6.	76
Figura 65. Imágenes de pantalla de gráficos 3D de radiación global horizontal de la ciudad de Santiago, Chile. Izquierda AndrewMarsh, derecha Climate Consultant 6.	77
Figura 66. Secciones de gráfico de radiación solar, mañana, medio día y tarde en la ciudad de Santiago, Chile. 21 diciembre. Imagen de pantalla extraída de AndrewMarsh.	77
Figura 67 Secciones de gráfico de radiación solar, mañana, medio día y tarde en la ciudad de Santiago, Chile. 04 junio. Imagen de pantalla extraída de AndrewMarsh.	78
Figura 68. Secciones de gráfico de radiación solar, mañana, medio día y tarde en la ciudad de Santiago, Chile. 21 septiembre. Imagen de pantalla extraída de AndrewMarsh.	78
Figura 69. Imágenes de pantalla, asoleamiento en solsticios y equinoccios de la ciudad de Concepción, Chile. Periodos diciembre a junio y diciembre a junio. Generadas a partir del software Climate Consultant 6.	79
Figura 70. Gráfico de radiación global horizontal anual en la ciudad de Concepción, Chile. Generados a partir del software Climate Consultant 6.	80
Figura 71. Imágenes de pantalla de gráficos 3D de radiación global horizontal de la ciudad de Concepción, Chile. Izquierda AndrewMarsh, derecha Climate Consultant 6.	81
Figura 72. Secciones de gráfico de radiación solar, mañana, medio día y tarde en la ciudad de Concepción, Chile. 01 enero. Imagen de pantalla extraída de AndrewMarsh.	81
Figura 73. Secciones de gráfico de radiación solar, mañana, medio día y tarde en la ciudad de Concepción, Chile. 21 junio. Imagen de pantalla extraída de AndrewMarsh.	82

Figura 74. Secciones de gráfico de radiación solar, mañana, medio día y tarde en la ciudad de Concepción, Chile. 21 septiembre. Imagen de pantalla extraída de AndrewMarsh.	82
Figura 75. Imágenes sobre estrategias de diseño pasivo. Fuente: Climate Consultant 6.0.	85
Figura 76. Diagrama de orientaciones para la evaluación de sombras.....	87

Índice de tablas

Tabla 1. Detalle técnico proceso de impresión días 2 a 6.....	45
Tabla 2. Detalle técnico proceso de impresión días 7 a 10.....	46
Tabla 3. Detalle técnico proceso de impresión días 11 a 14.	47
Tabla 4. Detalle técnico proceso de impresión días 14 a 17.	48
Tabla 5. Acondicionamiento térmico de elementos opacos, complejo de techumbre, muro, piso y puerta.	54
Tabla 6. Resumen cumplimiento de muros a zonificación térmica.	66
Tabla 7. Radiación global directa por ciudad, fecha y orientación.....	83
Tabla 8. Información climática ciudad de Antofagasta, Chile.	88
Tabla 9. Resultados del desempeño térmico de prototipos en ciudad de Antofagasta.	95
Tabla 10. Información climática ciudad de Santiago, Chile.....	96
Tabla 11. Resultados del desempeño térmico de prototipos en ciudad de Santiago.	103
Tabla 12. Información climática ciudad de Concepción, Chile.....	104
Tabla 13. Resultados del desempeño térmico de prototipos en ciudad de Concepción.	111
Tabla 14. Resultados del desempeño térmico de prototipos en las tres zonas térmicas.	112

INTRODUCCIÓN

La industria de la construcción es una de las que mayor contaminación aportan al planeta. Según el programa de las Naciones Unidas para el medioambiente a través de “Global Alliance for Buildings and Construction” (GlobalABC), al 2019 alrededor del 37% de los gases de efecto invernadero (CO₂) relacionados a la energía se debe a la operación y construcción de los edificios.

El hormigón se caracteriza por no presentar buenas cualidades térmicas, teniendo valores de conductividad térmica elevados comparado a otros materiales del “Listado oficial de soluciones constructivas para el acondicionamiento térmico (MINVU)”, por lo que el diseño de la envolvente de la edificación se vuelve un factor relevante para mejorar el confort de sus ocupantes.

Determinando las condiciones del material para su uso en edificaciones en distintas localidades de Chile, según la zonificación climático habitacional de la NCh 1079. Se establecen condicionantes para la elección de prototipos a evaluar según fachada, valores de transmitancia térmica calculados en base NCh 853:2021 y los mínimos que debe presentar para elementos opacos del “Manual de aplicación de certificación vivienda sustentable”

Se contempla el desarrollo de prototipos de muros en software “Rhino7” y “Grasshopper”, en colaboración con la empresa Sika, especialistas en el desarrollo de productos químicos para la construcción. Dentro del proceso se evaluarán los siguientes parámetros: trayectorias, geometrías, composición de mezcla, velocidad, entre otros.

Por principios de diseño pasivo mediante la geometría de fachada y estructura interna, los prototipos pueden ser: auto sombreados o “Self-Shading”, con la incorporación de materiales aislantes en su interior, mejorando propiedades térmicas del muro según requiera la zona climática en la cual serán evaluados. Como proyección, esta investigación puede ser un recurso de guía para normalizar la construcción de hormigón impreso 3D en Chile, incorporando este método de construcción a la industria 4.0.

ANTECEDENTES

El desarrollo de la presente memoria forma parte de un proyecto FONDEQUIP – ANID EQM 210225: Impresora Industrial 3D, para prototipado a mayor escala de elementos funcionales y sistemas constructivos con mezclas cementicias optimizadas, liderado por la doctora Claudia Muñoz de la Universidad del Bío-Bío. La UTFSM colabora en dicho proyecto a través de la investigación aplicada: “Programación de trayectorias de extrusión para micro voladizos en muros y columnas impresas tridimensionalmente en hormigón” dirigido por la profesora Veronica Arcos. Es con relación a este último que nace el tema de la presente memoria donde el enfoque estará dirigido a la eficiencia energética de las edificaciones que utilicen esta tecnología.

Se revisa y analiza los estados de avance actuales en el mundo y el país respecto a la implementación de la tecnología de impresión 3D de áridos e investigaciones relacionadas al desempeño climático. En la industria de la construcción este estudio busca referenciarse en estos para dar cuenta de las posibles nuevas aristas del material, la tecnología y la implementación de métodos más eficientes para el diseño de envoltentes de las edificaciones.

El sector de la construcción ha comenzado a experimentar un incremento en el avance en técnicas de prefabricación y métodos industrializados desde mitades de siglo XX, dada la necesidad de reconstrucción y la demanda creciente de viviendas, buscando en la década de 1950 en adelante estandarizar procesos y componentes de las edificaciones. Colocando de ejemplo a países como Estados Unidos, pionero en técnicas de prefabricación y construcción modular. Japón con innovación en ingeniería y tecnologías de construcción, y Alemania con avances en métodos de construcción industrializada.

En los últimos años, se mantiene la demanda de vivienda a nivel mundial y a ella se suma el factor climático, este último ha promovido la elaboración de estándares internacionales y nacionales respecto al impacto ambiental, energético y calidad de vida en las edificaciones, tales como la certificación LEED (USA),

manuales de reglamentación térmica, CEV (Chile), BREEAM (U.K.), estándares de gestión ambiental ISO 14001, entre otros estándares locales y globales.

Actualmente en Chile la industria y academia apuntan a la transformación digital de la construcción para la mejora del sector, tanto en ámbitos de costo monetario, escasez de materiales, reducción de emisiones, escasez de mano de obra, buscando ser más sustentables y productivos. Estos procesos requerirán de coaliciones, innovación, seguridad, calidad, ambientes controlados, ensamblar en obra, entre otros.

La nueva implementación tecnológica aportará al desarrollo de nuevos métodos de construcción más sustentables y sostenibles en el tiempo, optimizando la materia utilizada para diversas actividades del sector, como la producción de paneles, terminar con la necesidad de incorporar encofrados para hormigones, reducir los tiempos de ejecución, manufactura y/o montaje en fábricas o terreno, entre otras características.

La productividad de la construcción es de 0.24m² hombre/día en Chile, versus 0.37m² hombre/día en países referentes de la OCDE, además el costo de mano de obra es mayor según los datos del Instituto Nacional de Estadísticas (INE).

- Proyectos realizados a nivel nacional para la actualización del rubro de la construcción: Construye2025, CCI, CDT, Cipys, PlanBIM, Consejo de Construcción Industrializada de la CChC.
- Elaboración de una Hoja de Ruta 2022-2025, destacando principalmente: industrialización, sustentabilidad, transformación digital, capital humano e innovación.

A nivel de desarrollo tecnológico, el “Institute for Advanced Architecture of Catalonia” (IAAC) presenta una variedad de programas de estudio e investigación en robótica, construcción con biomateriales, entre otros. El enfoque de la institución es el desarrollo de una construcción ambientalmente responsable.

Dentro de los programas y proyectos desarrollados e investigaciones. “TOVA” es un prototipo de vivienda impresa en 3D utilizando tierra del lugar y construida con la impresora Crane WASP, de la empresa italiana WASP. Desarrollado por estudiantes e investigadores del programa de postgrado de “3D Printing Architecture” (3DPA) del IAAC.



Figura 1. *Proyecto vivienda impresa "TOVA" de IAAC.* Fuente: IAAC.

La ejecución de la impresión se realizó en colaboración con profesionales del área de arquitectura, Verónica Arcos e industria química por parte de la empresa Sika, Carolina Valdebenito y Hugo Olivares. Quienes aportaron en el desarrollo de la primera etapa, la modelación e impresión de los prototipos.

CAPÍTULO 1. Marco Teórico

Pregunta de Investigación

¿Qué parámetros geométricos de diseño de la envolvente vertical de edificaciones pueden mejorar el desempeño térmico de muros de hormigón impreso 3D para adaptarlo a diversos contextos climáticos?

Preguntas Secundarias

Dada la alta conductividad térmica del hormigón, ¿de qué manera la cámara de aire estanca influye en la transmitancia térmica final de la solución constructiva y el posible relleno con aislante?

¿En qué medida la geometría de la superficie exterior permite controlar la incidencia de la radiación solar sobre la solución de muros impresos 3D a partir del auto sombreado del elemento?

Hipótesis

Los modelos tridimensionales de muros en base a la programación de sus parámetros geométricos mejorarán el desempeño energético de la envolvente por medio de la impresión 3D en Hormigón. Primero usando la variable de doble capa con cavidad de aire más relleno con aislante y segundo, con una geometría de auto sombreado en la cara exterior.

Metodología



Figura 2. Esquema de la secuencia investigativa. (Elaboración propia).

La metodología de experimentación contempla el desarrollo de prototipos de muros digitales en “Rhino7” y “Grasshopper”, materializados en impresión 3D de hormigón. El desarrollo y resultado de estos considera la posterior evaluación de transmitancia térmica con los softwares “AndrewMarsh”, “ClimateConsultant” y “LadyBug” analizando las características térmicas en base a los climas de estudio de Antofagasta, Los Andes y Concepción. Con los que se determina el porcentaje de auto sombreado en cada una de las ciudades.

Finalizando con la comparación térmica entre las características de muros impresos y tradicionales, indicando los valores de mejora y proyecciones de la investigación.

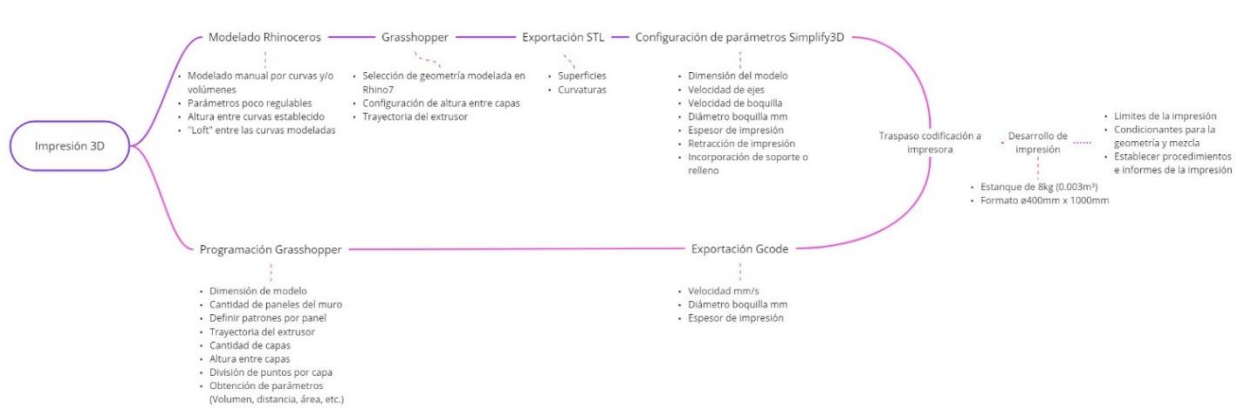


Figura 3. Esquema procedimiento impresión 3d. (Elaboración propia).

Las impresiones de los prototipos darán cuenta de la estabilidad estructural de estos, factor relevante para determinar las geometrías modeladas. Además, los prototipos serán evaluados climáticamente.

El proceso comienza desde la modelación de curvas en Rhinoceros durante las primeras impresiones y los parámetros de impresión se configuran en "Simplify3D", luego se avanza en las impresiones, se elabora protocolos en "Grasshopper", y se exporta la codificación directamente a la impresora "WASP 40100".

Los resultados dan cuenta de las limitantes de la impresión, condiciones necesarias para las geometrías y procedimientos para imprimir.

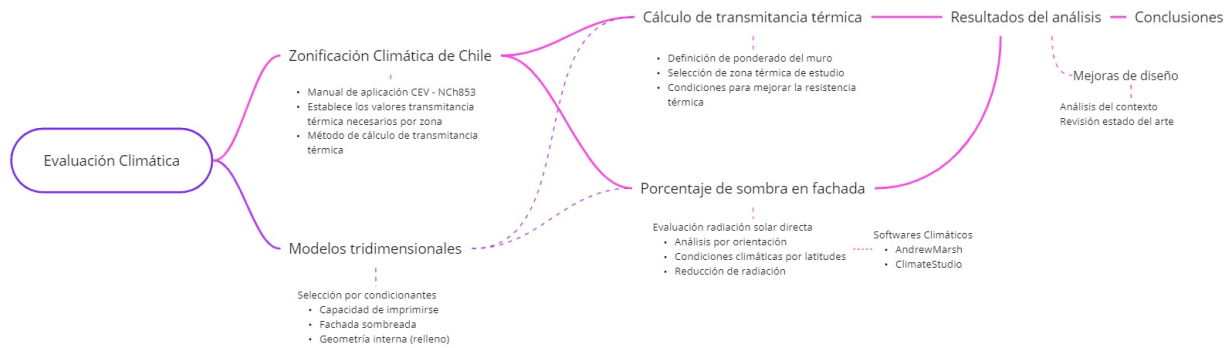


Figura 4. Esquema evaluación climática. (Elaboración propia).

Se definirán rangos de latitudes para conceptualizar el proyecto a variables climáticas divididas en tres zonas; norte, centro y centro-sur, para posteriormente evaluar los comportamientos de radiación solar y adaptaciones que requerirían los muros para mejorar el desempeño. De esta forma, responderán a la variable climática del lugar comparando a la tabla de valores de transmitancia térmica del manual de certificación de edificación sustentable (CES), validando el desarrollo tipológico de los prototipos.

Elaborando informes comparativos del porcentaje de radiación solar y transmitancia térmica entre los modelos de muros por orientación, ubicación geográfica, porcentaje de ganancia solar.

CAPÍTULO 2. Desarrollo Prototipos de Muro

El capítulo consiste en la elaboración de modelos que se plantean como elemento constructivo muro, se componen principalmente de paneles verticales y cavidades internas, teniendo consideraciones especiales para su confección, contar con una fachada exterior (elemento panel) que permita auto sombrearse por su propia morfología. Presentar cavidades internas que puedan ser rellenas de aislantes y tener cámaras de aire estancas, con la finalidad de determinar los valores de transmitancia térmica de cada modelo desarrollado y establecer cuales condiciones son óptimas a cada contexto.

Durante el desarrollo de los modelos se irá verificando la geometría de las trayectorias, a través de protocolos en “Grasshopper” que pueden precisar la cantidad de puntos por cada capa de trayectoria que recorrerá la impresora, de esta manera lograr curvas con mayor definición. Control y parametrización de la dimensión total del muro, el distanciamiento entre los paneles, cantidad de voladizos en fachada, etc.

Los modelos elaborados son testeados a escala, obteniendo los parámetros para definir una guía y configuración de la impresora y la mejora del prototipo, para el desarrollo de impresión se trabaja en las instalaciones de la empresa Sika en la ciudad de Santiago con la máquina WASP 40100, adaptando su uso para imprimir con hormigón, mezcla especialmente formulada por Sika para impresiones 3D.

Las pruebas ejecutadas, permiten visualizar posibles adaptaciones y mejoras según la escala de impresión 1:5, 1:10 y 1:20, las velocidades que adapta la máquina según la trayectoria, la geometría del modelo 3D, rangos permisibles por capacidad y cantidad del material, rangos de compresión de aire (MPa), configuraciones de procesamiento y programación del modelo a “gcode”.

La capacidad de impresión de la máquina queda limitada por las piezas y la mezcla de hormigón que se utiliza. Probando la impresora WASP se obtienen los datos con los cuales se configura el software de procesamiento de información. Los modelos 3D probados parten desde curvas generadas en “Rhinceros” hasta protocolos de “Grasshopper”, desde el cual se exporta la codificación a la impresora.

Se presentan a continuación los resultados de los modelos impresos en las etapas de visitas a las instalaciones de SIKA. Adjunto a fotografías de los prototipos fabricados y una breve descripción del modelo, parámetros utilizados en la impresión y un análisis del resultado.

Día 4 (17-05-2022)

Debido a errores de trayectorias por motivos de escala del modelo original del muro, el que consideraba 3 pilares internos, se realiza el modelo de impresión muro solo con las tres salientes verticales, con una dimensión de 320x84x340mm.

Debido a un error de la geometría en la exportación a Simplify3D, la parte trasera presentó deformaciones en la junta del lado lateral e interior del muro.

Altura de capa 3mm / boquilla de extrusor 8mm /
Velocidad de impresión 100mm/s

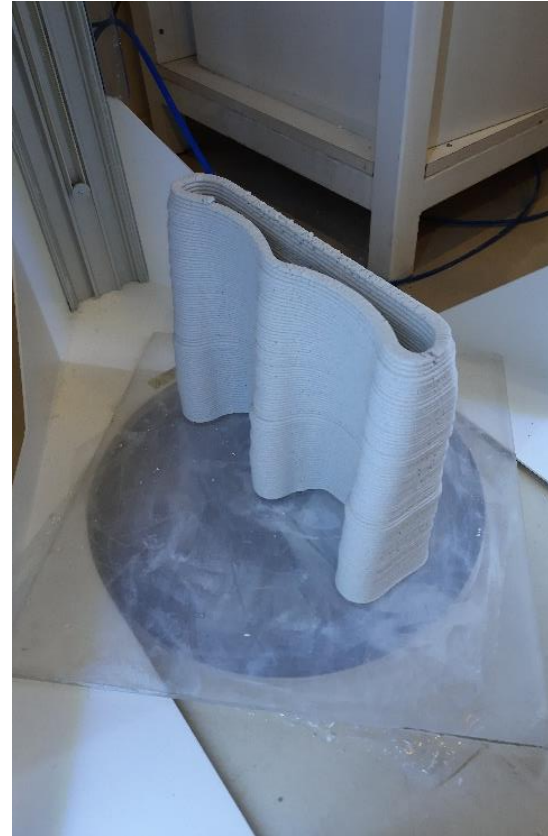


Figura 5. Fotografía resultado modelo impreso día 4.

Día 6 (31-05-2022)

Se configura un modelo de impresión el cuál considera voladizos en el diseño de su fachada, dichos elementos van atenuando su saliente a medida que el muro toma mayor altura y a su vez disminuye en espesor.

La mezcla presenta problemas al momento de imprimir, debido a la escala del modelo (150x35x300mm) y la velocidad de impresión. Las curvas resultaron muy cerradas y se mantuvo una velocidad constante en la trayectoria de cada capa lo cual provoco un arrastre del cordón de impresión, teniendo que regular la presión de aire. Finalmente se asentaron las curvas del primer voladizo por el peso generado de las curvas superiores, resultando en el derrumbe de la fachada exterior.

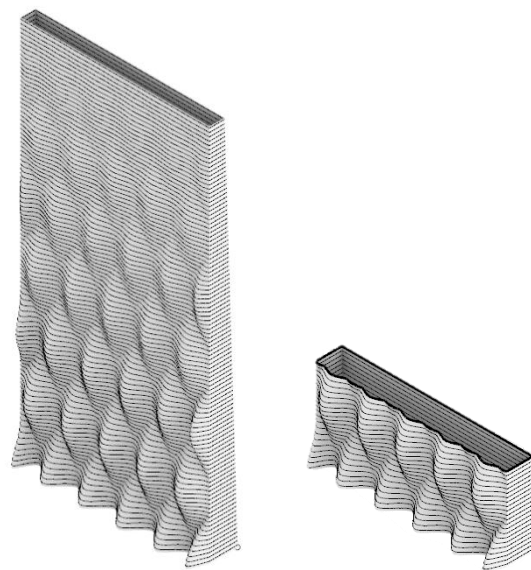


Figura 6. Modelo 3d proyectado versus altura lograda de impresión.



Figura 7. Fotografía resultado modelo impreso día 6.

Día 7 (07-06-2022)

En base a la falla del día 6 se prueba modificar su geometría para que la curvatura sea mayor, modificando en primera instancia la escala de 1:10 a 1:20 y escalando en el eje X de 200mm a 250mm. Obteniendo una trayectoria en la curva más prolongada.

Configuración modelo A

Dimensiones: 250x46x400 mm

Configuraciones Simplify3D: Extrusor 8mm /Altura de capa 3mm / Velocidad de impresión 70mm/s / Retracción de velocidad 30mm/s

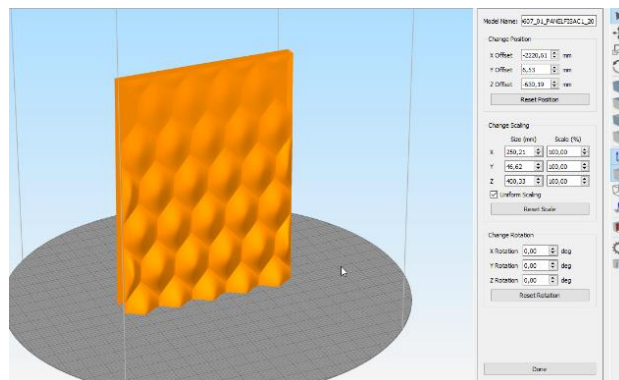


Figura 8. Imagen de pantalla configuración de modelo en Simplify 3D.

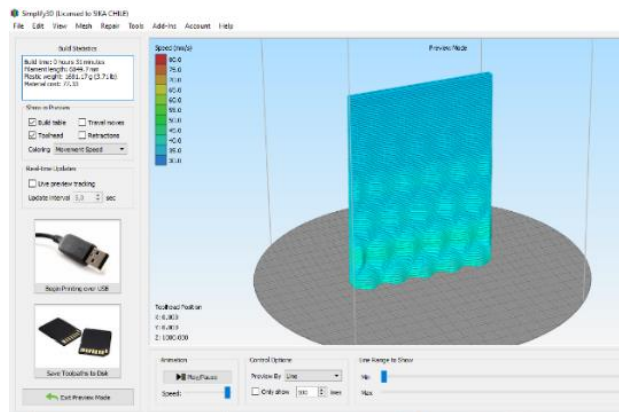


Figura 9. Previsualización de impresión y rangos de velocidad modelo Simplify 3D.



Figura 10. Fotografías modelos impresos resultantes día 7, medición de largo y alto modelo C.

Modelo A colapsado – Modelo C desarrollo impresión 8min. a mayor altura de modelo se alcanzan los límites de presión de aire, entregando un cordón grueso que empuja y presiona las capas hacia abajo y el extrusor de manera horizontal.

Día 8 (14-06-2022)

Desarrollo de trayectoria para amarrar el panel de fachada exterior con el panel de fachada interior por medio de un relleno, con esto se busca que la geometría soporte los voladizos del muro del día 7.

Se realizaron 3 pruebas, 2 de ellas consisten en el desarrollo de conexión entre las fachadas por el relleno, y 1 en el desarrollo de la misma geometría sin relleno.

La separación entre las curvas es de 8mm para el panel de fachada y relleno, entre relleno y fachada interior de 10mm. Con esto se consigue entrelazar las capas de cada panel.

Se introduce una trayectoria de recorrido continuo, esto se desarrolló con curvas abiertas desarrolladas en Rhino.



Figura 11. Fotografía cenital modelo impreso día 8, muestra del grosor cordón de impresión y cavidades del muro.

Día 9 (29-06-2022)

En base a la trayectoria lograda en el día anterior se trabaja con este muro para obtener una geometría óptima para la evaluación climática.

El archivo fue exportado directamente desde Grasshopper, sin la necesidad de exportarlo a Simplify3D, con esto se acortan los tiempos para obtener los códigos de impresión y hacer más productivo el día de trabajo.

El modelo impreso presenta ciertas complicaciones en el proceso de impresión, las principales causas son: la capacidad del estanque, la fluidez de la mezcla, capacidad de presión de aire de la máquina que es suministrada al estanque para la continuidad de trabajo con la mezcla.

El relieve a la mitad de altura del muro fue por una sobrepresión de aire suministrado, y el agrietamiento de las capas superiores fue dado por el límite de presión alcanzada por la máquina.

Velocidad: 2400mm/min / Espesor: 6mm / División de curvas: 300 puntos por capa / Altura de capa 3mm / Dimensión 215x65x300mm / distanciamiento entre capas 8mm



Figura 12. Fotografía prototipo impreso día 9.



Figura 13. Fotografía prototipo impreso día 9.

Día 10 (05-07-2022)

Con el resultado y función lograda para entrelazar capas de los modelos, se continuó al desarrollo de la trayectoria implementada en el día 9 a la geometría del día 7, esperando el desarrollo de una mayor altura y evitar el colapso del prototipo.

Configuración de Grasshopper:

PanelPanalV4_A

Velocidad: 3000mm/min / Espesor: 8mm / División de curvas: 300 puntos por capa / Altura de capa 3mm / Dimensión 250x52x500mm / distanciamiento entre capas 6mm.

PanelPanalV4_C

Se mantienen idénticas características, se disminuye el distanciamiento para el traslape entre las capas a 5mm.

Una de las problemáticas durante las impresiones fue el largo del recorrido, que aumento el tiempo de impresión por lograr la estabilidad del muro. Para ello se puede llegar a reducir uno de los paneles del muro interior, trabajando en el desarrollo de un protocolo en Grasshopper.

Impresión no finalizada debido a la presión máxima alcanzada por el equipo (0,7MPa), la preparación fue de 8kg de mezcla, preparando en 2 fases, la primera de 4kg y 16% de agua y para la segunda 4kg y 17% de agua.

Además, la separación que hay entre curvas es la correcta, pero al ir incrementando la curva hacia fuera el cordón es desplazado afuera del muro. Provocando también un movimiento vertical en los voladizos de la segunda sección.

Según la fluidez con la cual sale el material para la zona de curvaturas, se puede controlar el desplazamiento horizontal del cordón y disminuir el deslizamiento en la vertical de los voladizos.



Figura 14. Fotografía proceso de impresión 3D modelo A día 10.



Figura 15. Fotografía resultado impresión modelo A.

La siguiente impresión fue preparada con 4 kg de mezcla y 16% de agua. Durante el desarrollo de esta impresión la separación horizontal entre las curvas de los paneles es de 5mm, quedando solapadas generando a modo de nervadura o quedando entrelazados, evitando el colapso de la fachada.



Figura 16. Fotografía frontal resultado impresión modelo C.



Figura 17. Fotografía cenital resultado impresión modelo C.

Día 11 (19-07-2022)

Para revisar la capacidad de la impresora Wasp, se evaluaron trayectorias inclinadas para analizar la posibilidad de replicar en fachadas.

El modelo impreso tiene $\varnothing$ 250mm y altura de 360mm, fue impreso con 4 kg los cuales no fueron suficientes para la impresión completa del prototipo.

En una segunda impresión se evaluó en el aire a 75% de escala, completándose en 20 minutos.

Para la impresión se prepararon dos mezclas de 4kg cada una, la primera con 16.8 % y la segunda con 17% de agua.

La altura de capas se mantuvo en 3mm, a velocidad de 55mm/s, con una división de 150 puntos

Las capas que quedaron más juntas tendieron a engrosar más la pared y el lado opuesto desarrolló una mayor altura. Al llegar a la zona superior la boquilla roza el cordón de la zona alta, generando un agrietamiento en estas. Resultando esto en una inclinación máxima de impresión.

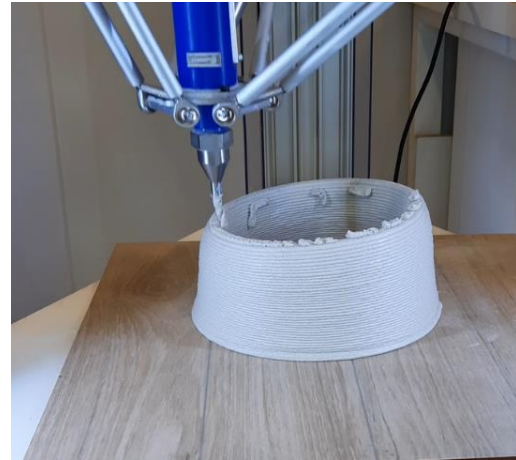


Figura 19. Fotografía del proceso de impresión modelo día 11.



Figura 18. Fotografía resultado modelo de impresión día 11.

Día 12 (27-07-2022)

Desde “Grasshopper” se logra un protocolo para el desarrollo de los voladizos de la fachada, una separación paramétrica entre las curvas interiores, centro (relleno) y exteriores. Con esto se busca conectar las curvas interiores y exteriores a través de su relleno, el cual traslapándose dará soporte al muro y estabilidad. Se espera con esta prueba en un salto de escala poder rellenar los vacíos internos del muro con aislantes, tal como celulosa, fibras, pajas, etc. Además de admitir una cámara de aire entre el panel interior y relleno. También considera la mejora en el desempeño energético, al reducir un panel de la impresión, reduciendo la cantidad de material requerido.

Prueba 1

Se realiza una prueba con 4kg de mezcla y 16,5% de agua. Las dimensiones del muro son 250x55x306mm.

Las configuraciones de impresión programadas son:

F:3300mm/min – 600 puntos de división – Extrusor 8mm – Altura de capa 3mm – distancia entre paneles 6mm.

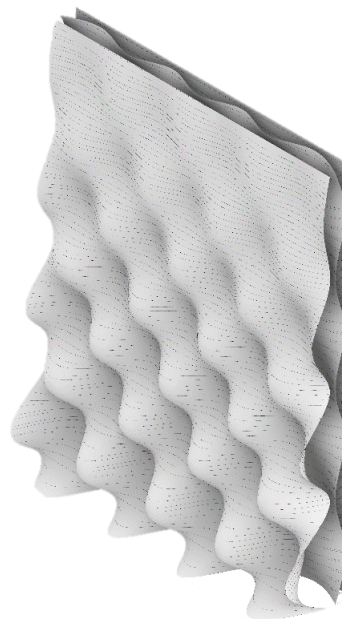


Figura 20. Modelo A día 12, resultado de protocolo 3D.



Figura 21. Fotografía resultado impresión día 12.

Prueba 2:

La segunda prueba realizada con 8 kg de mezcla, en dos dosificaciones 17,2% y 17,5% de agua, la prueba resulto en un muro que no se completó debido a la mezcla, entre los primeros 3 y 5cm de altura del muro la mezcla estaba muy fluida, terminando en su asentamiento, teniendo que repetir la impresión, luego por trabajabilidad se llegó a presiones máximas admitidas por el equipo, aproximadamente 0,75 MPa.

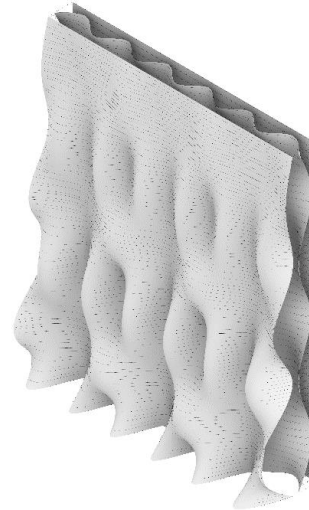


Figura 22. Modelo B día 12, Resultado protocolo Grasshopper.



Figura 23. Fotografía resultado impresión modelo B día 12, detalle en uso de fibras zona inferior derecha.

Prueba 3:

La tercera impresión consistió en el escalado del primer modelo a 255x55x303mm, con la cantidad de materia prima disponible en el laboratorio poder elaborar 4kg de material e imprimir con una boquilla de 6 mm dada la escala del modelo. La prueba resulto incompleta debido a que el material requería una mayor presión para pasar por la boquilla del extrusor, taponeando esta y llegando al límite de presión de la máquina.

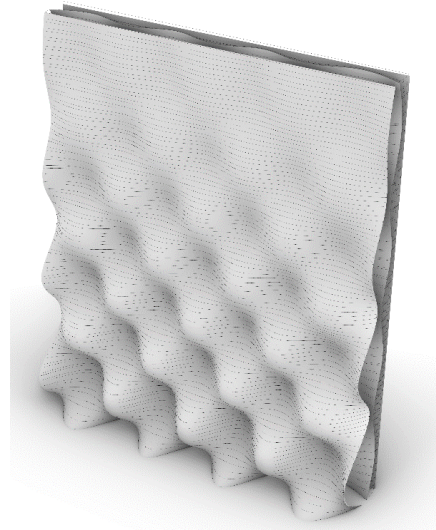


Figura 25. Modelo C día 12, desarrollo protocolo Grasshopper.



Figura 24. Fotografía resultado impresión modelo C día 12, detalle en uso de fibras zona inferior derecha.

Día 13 (02-08-2022)

Se realizaron 3 modelos impresos, corrigiendo la trayectoria de la fachada exterior del día 12, quedando programado el encuentro de la fachada exterior hacia el relleno. El parámetro de Grasshopper permite graduar el espesor y el distanciamiento entre los paneles de muro. Debido a la falta de materia prima para la mezcla del cemento, se testeó con la dosificación de las materias disponibles.

Prueba 1

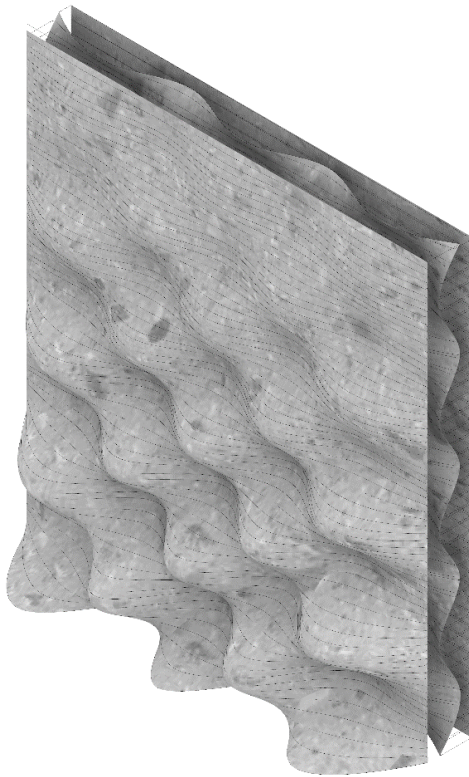


Figura 26. Modelo A día 13, Desarrollo protocolo Grasshopper.



Figura 27. Fotografía resultado impresión modelo A día 13.

Prueba 2:

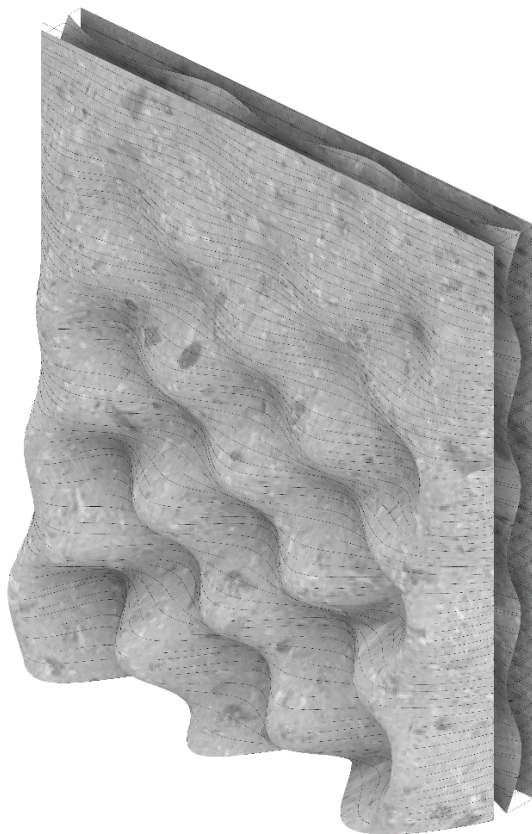


Figura 28. Modelo B día 13, modelo realizado en Grasshopper.



Figura 29. Fotografía resultado impresión modelo B día 13.

Las 2 primeras pruebas presentaron una mayor fluidez en la mezcla, además que la trayectoria por capas salió del eje de los cordones inferiores, tendiendo a tumbar el cordón recién impreso. Para ello se debe regular el aumento en la altura de los voladizos, evitando un desplazamiento brusco de la trayectoria al ir modificando la geometría del muro. Debido a esta condición se trabajará un ángulo no superior a 35° del eje de trayectoria entre capa y capa. Logrando en el desarrollo de la tercera impresión cordones con un espesor más uniforme, pero quedando compactados por los superiores, sin tender a desmoronarlos.

Prueba 3:

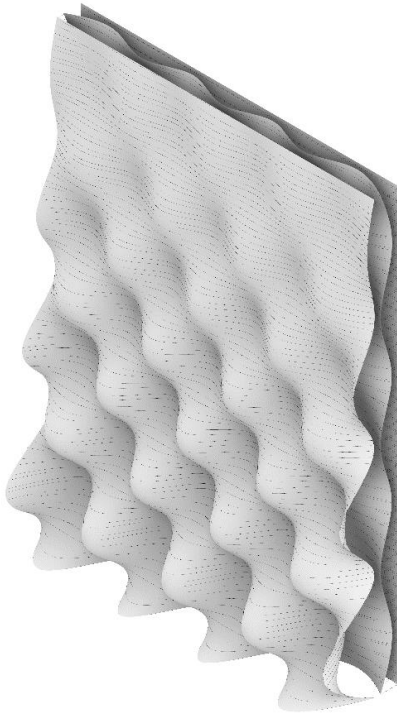


Figura 31. Modelo C día 13, modelo realizado en Grasshopper.



Figura 30. Fotografía resultado impresión modelo C día 13.

Día 14 (11-08-2022)

Se llevo a cabo dos pruebas de impresión a escala 1:10 verificando trayectorias con voladizos más atenuados, para cuando imprima el extrusor no se despegue demasiado el eje de la trayectoria inferior.

Se vuelve a la cantidad de 4 paneles que conforman el muro, definiendo doble cámara de aire estanco y una para aislante.

Parámetros modelo 1: Preparación de 2 mezclas de 3kg de material en dosificación de agua de 17% y 17.25%.

Velocidad: 3300mm/min / Espesor: 8mm / División de curvas: 600 puntos por capa / Altura de capa 3mm / Dimensión 200x45x240mm / distanciamiento entre capas 5mm y 8mm para capa relleno e interior.

La mezcla tuvo una mayor fluidez, permitiendo trabajar a menor presión de aire por mayor tiempo, alcanzando un 84% de impresión debido al asentamiento y mayor cantidad material extruido en las primeras capas.



Figura 33. Modelo A día 14, modelo realizado en Grasshopper, detalle composición de 4 paneles.



Figura 32. Fotografía resultado impresión modelo A día 14.

Parámetros modelo 2: Preparación de 2 mezclas de 4kg de material en dosificación de agua de 16.75% y 17%.

Velocidad: 3300mm/min / Espesor: 8mm / División de curvas: 600 puntos por capa / Altura de capa 3mm / Dimensión 200x45x240mm / distanciamiento entre paneles 4mm y 7mm para panel de relleno e interior.

Completando el segundo modelo 23 minutos.

Para evitar el error geométrico de los primeros modelos del día 13, se incrementó la altura de los voladizos y la cantidad a lo largo del muro, traducido en un menor desplazamiento del eje de la trayectoria.



Figura 34. Modelo B día 14, modelo realizado en Grasshopper, detalle composición de 4 paneles.



Figura 35. Fotografía resultado impresión modelo B día 14.

Día 15 (24-08-2022)

Se desarrolla modelo de escala 1:5 para impresión de prueba con bomba de extrusión y boquilla de 19mm.

Velocidad: 4800mm/min / Espesor: 19mm / División de curvas: 600 puntos por capa / Altura de capa 10mm / Dimensión 360x120x400mm / distanciamiento entre paneles 40mm.

El modelo fue completado en 10 min, solo se consideró panel de fachada exterior e interior.

Se desarrollo con 30 kg de material, preparadas en 3 dosis con 16% y las dos últimas con 16,5% de agua.

La primera impresión tuvo un colapso al ir completando la impresión, debido al aumento del agua utilizada, reciclando todo el material para una segunda impresión del mismo modelo, el cual se completó sin problemas.

Este muro representa una sección del muro realizado el día 9 el cual es evaluado en la etapa de análisis climático.

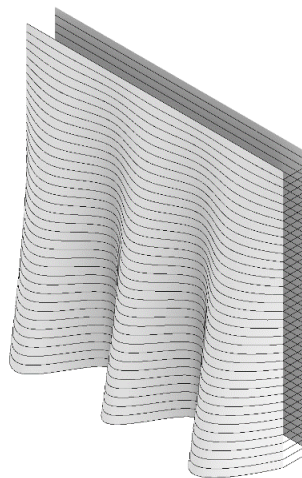


Figura 36. Modelo A día 15, modelo realizado en Grasshopper, variación de escala y uso de 2 paneles.

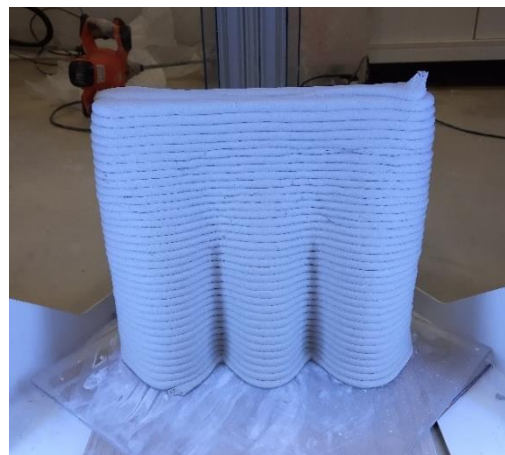


Figura 37. Fotografía resultado impresión modelo A día 15.

Día 16 (01-09-2022)

Se desarrollan dos modelos en escala 1:10 para impresión de prueba con estanque y boquilla de 8mm.

En una primera prueba de impresión, se utilizan 4kg de la mezcla formulada para la bomba, la cual no tiene la fluidez necesaria para pasar por el extrusor, aun aplicando la máxima presión de aire conseguida de 0,7Mpa.

Velocidad: 3900mm/min / Espesor: 8mm / División de curvas: 600 puntos por capa / Altura de capa 3mm / Dimensión 240x55x300mm / distanciamiento entre paneles 6mm, para panel de relleno e interior 10mm.

El modelo llego al 47% de impresión en 10 min, solo se consideró panel de fachada exterior, relleno e interior. Dimensión resultante de impresión

Se desarrollo con 6 kg de material, preparadas en 2 dosis de 4kg al 17% y 2kg con 17,25% de agua.

La impresión no alcanza a ser completado debido a la perdida de agua y presión de la mezcla por el hilo de la boquilla y el extrusor. El desarrollo de este muro pasará a evaluación climática.



Figura 38. Modelo A día 15, modelo realizado en Grasshopper.



Figura 39. Fotografía cuerpo de extrusor de impresora tapada.

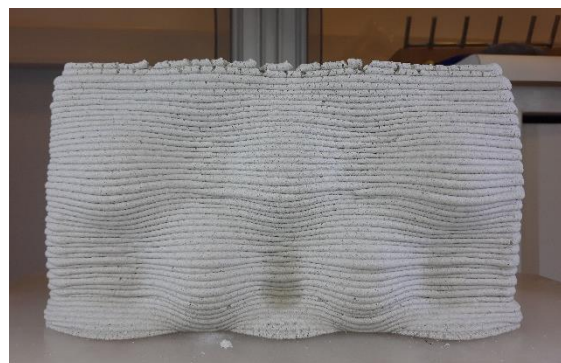


Figura 40. Fotografía resultado impresión modelo A día 16.

Día 17 (08-09-2022)

Se desarrollan dos modelos en escala 1:5 para impresión de prueba con estanque y boquilla de 8mm. De ambos solo se realizó el primero.

Se desarrollo con 8 kg de material, preparadas en 2 dosis de 4kg al 17% de agua. El modelo llego al 37% de impresión en 19 min, solo se consideró panel de fachada exterior, relleno e interior.

Velocidad: 4200mm/min / Espesor: 8mm / División de curvas: 600 puntos por capa / Altura de capa 3mm / Dimensión 240x70x240mm / distanciamiento entre paneles 5mm, para panel de relleno e interior 8mm.

La impresión no alcanza a ser completado debido a la perdida de agua y presión de la mezcla por el hilo de la boquilla y el extrusor.

El desarrollo de este muro pasará a evaluación climática.

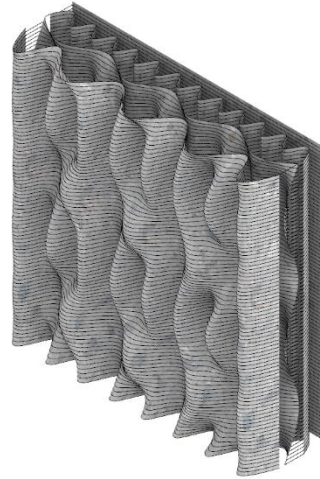


Figura 42. Modelo A día 17, modelo realizado en Grasshopper, detalle composición de 4 paneles más variación de escala.



Figura 41. Fotografía resultado impresión modelo A día 17.

2.1. Información Técnica Impresión

Tabla 1. *Detalle técnico proceso de impresión días 2 a 6.*

D2-P1

D2-P2

D3-P1

D3-P2

D4-P1

D6-P1

PARAMETROS	DIMENSION ESCALA	87x87x400mm 1:10	129x129x480mm 1:10	115x115x400mm Escala 20% 1:10	149x120x652mm	320x84x340mm 1:20	150x35x300mm 1:10
TIPO MEZCLA	TIPO A COMPOSICIÓN DE MEZCLA CANTIDAD / % HUMEDAD	• 1 DOSIFICACIÓN • 3Kg con 16.6% (500ml)	• 1 DOSIFICACIÓN • 4Kg con 17% (680ml)	1 DOSIFICACIÓN 4Kg con 17% (680ml)	1 DOSIFICACIÓN 4Kg con 17% (680ml)	DOSIFICACIÓN CON BOMBA	2 DOSIFICACIONES 4Kg con 16.6% (500ml) 4Kg con 17% (680ml)
PROGRAMACIÓN	VELOCIDAD DE IMPRESIÓN ALTURA DE CAPAS DIVISIÓN DE PUNTOS POR CURVA SOFTWARE	• 50 mm/s • h = 5mm • NO CONSIDERA • RHINO 7 - SIMPLIFY 3D	50 mm/s h = 3.5mm NO CONSIDERA RHINO 7 - SIMPLIFY 3D	50 mm/s h = 4mm NO CONSIDERA RHINO 7 - SIMPLIFY 3D	50 mm/s h = 2.5mm NO CONSIDERA RHINO 7 - SIMPLIFY 3D	100 mm/s h = 3mm NO CONSIDERA RHINO 7 - SIMPLIFY 3D	36 mm/s h = 3mm NO CONSIDERA RHINO 7 - SIMPLIFY 3D
CONFIGURACIÓN IMPRESORA	DIAMETRO BOQUILLA TIEMPO IMPRESIÓN	Ø 8mm (9.6mm - Simplify3D) SIN REGISTRO	Ø 4mm (4.8mm - Simplify3D) SIN REGISTRO	Ø 8mm (9.6mm - Simplify3D) 22 min	Ø 4mm (4.8mm - Simplify3D) SIN REGISTRO	8mm (9.6mm - Simplify3D) SIN REGISTRO	8mm (9.6mm - Simplify3D) 3 min / 40min
GEOMETRÍA MURO	CANTIDAD DE PANELES PORCENTAJE IMPRESIÓN	1 80% DESARROLLADO	1 NO COMPLETADO	1 COMPLETADO	1 10% DESARROLLADO	2 COMPLETADO	2 NO COMPLETADO
RESULTADOS	OBSERVACIÓN			Dificulta con dial regulador de presión (0.15Mpa-0.45Mpa) para una mezcla homogénea	Perdida de humedad por Ø extrusor, con una mayor presión los primeros cordones resultaron perfectos hasta quedar sin fluidez la mezcla		Las curvas muy cerradas y mantienen la velocidad constante en la trayectoria, provoco un arrastre del cordón inferior, Para ello se corrige la velocidad y verifica la presión de aire en la zona externa.

Tabla 2. Detalle técnico proceso de impresión días 7 a 10.

D7-P1 D7-P2 D8-P1 D9-P1 D10-P1 D10-P2							
PARAMETROS	DIMENSION ESCALA	250x46x400mm 1:10	250x80x400mm 1:20	330x100x470mm Escala 15%	215x65x300mm 1:10	250x52x500mm 1:10	250x52x500mm 1:10
TIPO MEZCLA	TIPO A COMPOSICIÓN DE MEZCLA CANTIDAD / % HUMEDAD	• 1 DOSIFICACIÓN • 3Kg con 16.6% (500ml)	• 1 DOSIFICACIÓN • 4Kg con 17% (680ml)	2 DOSIFICACIONES 4Kg con 16.6 (664ml) 4Kg con 17% (680ml)	1 DOSIFICACIÓN 4Kg con 17% (680ml)	2 DOSIFICACIÓN 4Kg con 16% (640ml) 4Kg con 17% (680ml)	1 DOSIFICACIÓN 4Kg con 16% (640ml)
PROGRAMACIÓN	VELOCIDAD DE IMPRESIÓN ALTURA DE CAPAS DIVISIÓN DE PUNTOS POR CURVA SOFTWARE	• 70 mm/s • h = 3mm • NO CONSIDERA • RHINO 7 - SIMPLIFY 3D	70 mm/s h = 3mm NO CONSIDERA RHINO 7 - SIMPLIFY 3D	50 mm/s h = 3mm NO CONSIDERA RHINO 7 - SIMPLIFY 3D	40 mm/s h = 3mm 300 PUNTOS RHINO 7 - GRASSHOPPER	50 mm/s h = 3mm 300 puntos RHINO 7 - GRASSHOPPER	50 mm/s h = 3mm 300 RHINO 7 - GRASSHOPPER
CONFIGURACIÓN IMPRESORA	DIAMETRO BOQUILLA TIEMPO IMPRESIÓN	Ø 8mm (9.6mm - Simplify3D) 5min/31min	Ø 8mm (9.6mm - Simplify3D) 8min	Ø 8mm (9.6mm - Simplify3D) 19min	Ø 6mm 19min	Ø 6mm 9min 20s	Ø 8mm 16min
GEOMETRÍA MURO	CANTIDAD DE PANELES % IMPRESIÓN	2 16% DESARROLLADO	2 20% DESARROLLADO	4 21% DESARROLLADO	1 40% DESARROLLADO	1 10% DESARROLLADO	1 15% DESARROLLADO
RESULTADOS	OBSERVACIÓN	Dosificación y formulación de mezcla perfecta. Escalando en el eje Y, prolongando el recorrido en las curvas y asignando una retracción de velocidad a 30mm/s. Problema sale del eje de trayectoria respecto al coron inferior	Necesita un elemento que logre mejorar la estabilidad de la fachada, pueden ser elementos de refuerzo o trabajar la geometría del modelo	Desarrollo de trayectoria para conectar paneles a través del relleno, consiguiendo mayor estabilidad en el panel de fachada exterior. Evaluando en dos impresiones el mejor distanciamiento entre paneles	Fallo de la primera impresión por fluidez de mezcla al momento de comenzar la impresión, reiniciando el proceso. La impresión queda limitada por el límite de presión de la máquina	Mezcla muy fluida en las primeras capas de impresión, por lo que se asientan.	Las dimensiones del modelo pequeñas para la escala de impresión sin llegar a generar los vanos interiores requeridos

Tabla 3. Detalle técnico proceso de impresión días 11 a 14.

D11-P1

D12-P1

D12-P2

D13-P1

D13-P2

D14-P1

PARAMETROS	DIMENSION ESCALA	Ø250x360mm Escala al 75% 187x270mm	250x55x306mm 1:10	250x55x300mm 1:10	200x54x216mm 1:10	200x57x216mm 1:10	200x42x216mm 1:10
TIPO MEZCLA	TIPO A COMPOSICIÓN DE MEZCLA CANTIDAD / % HUMEDAD	2 DOSIFICACIONES 4Kg con 16.8% (672ml) 4Kg con 17% (680ml)	1 DOSIFICACIÓN 4Kg con 16.5% (660ml)	2 DOSIFICACIONES 4Kg con 17.2 (688ml) 4Kg con 17.5% (700ml)	1 DOSIFICACIÓN 4Kg con 16% (640ml)	1 DOSIFICACIÓN 4Kg con 16% (640ml)	2 DOSIFICACIÓN 4Kg con 16.75% (670ml) 4Kg con 17% (680ml)
PROGRAMACIÓN	VELOCIDAD DE IMPRESIÓN ALTURA DE CAPAS DIVISIÓN DE PUNTOS POR CURVA SOFTWARE	55 mm/s h = 3mm 150 PUNTOS RHINO 7 - GRASSHOPPER	55 mm/s h = 3mm 600 PUNTOS RHINO 7 - GRASSHOPPER	55 mm/s h = 3mm 600 PUNTOS RHINO 7 - GRASSHOPPER	55 mm/s h = 3mm 600 PUNTOS RHINO 7 - GRASSHOPPER	55 mm/s h = 3mm 600 puntos RHINO 7 - GRASSHOPPER	55 mm/s h = 3mm 300 PUNTOS RHINO 7 - GRASSHOPPER
CONFIGURACIÓN IMPRESORA	DIAMETRO BOQUILLA TIEMPO IMPRESIÓN	Ø 8mm 20min	Ø 8mm 14min	Ø 8mm 16 min	Ø 8mm 12min	Ø 8mm 10min 20s	Ø 8mm 23min
GEOMETRIA MURO	CANTIDAD DE PANELES % IMPRESIÓN	1 COMPLETADO	3 40% DESARROLLADO	3 50% DESARROLLADO	3 68% DESARROLLADO	3 60% DESARROLLADO	4 COMPLETADO
RESULTADOS	OBSERVACIÓN	Evaluación de trayectorias inclinadas, para evaluar futuras geometrías con modelos de muro y evaluar ventilación de fachada.	Prueba de recorridos de trayectoria cerrada, el modelo es estable gracias al enlace de las capas exteriores e interiores, la zona derecha del muro queda abierta, quedando el voladizo sin cerrar	Para solucionar el recorrido abierto del primer modelo, esta implementa fibras para la conexión del cordón abierto con el muro interior	Falta mezcla para finalización de la impresión. Los cordones de la fachada exterior tendieron a desplazarse por la diferencia de trayectoria con el cordón inferior	Mezcla muy fluida en las primeras capas de impresión, por lo que se asientan.	Las dimensiones del modelo quedan pequeñas para la escala de impresión, sin llegar a generar los vanos interiores requeridos

Tabla 4. Detalle técnico proceso de impresión días 14 a 17.

D14-P2

D15-P1

D16-P1

D17-P1

PARAMETROS					
DIMENSION ESCALA		200x42x216mm 1:10	360x120x400mm 1:5	240x55x300mm 1:10	240x70x240mm 1:5
TIPO MEZCLA	TIPO A COMPOSICIÓN DE MEZCLA CANTIDAD / % HUMEDAD	2 DOSIFICACIONES 3Kg con 16.75% (502ml) 3Kg con 17% (510ml)	DOSIFICACIÓN CON BOMBA 10Kg con 16% (1600ml) 10Kg con 16.5% (1650ml) 10Kg con 16.5% (1650ml)	2 DOSIFICACIONES 4Kg con 17 (680ml) 2Kg con 17.25% (345ml)	2 DOSIFICACIÓN 4Kg con 17% (680ml) 4Kg con 17% (680ml)
PROGRAMACIÓN	VELOCIDAD DE IMPRESIÓN ALTURA DE CAPAS DIVISIÓN DE PUNTOS POR CURVA SOFTWARE	55 mm/s h = 3mm 600 PUNTOS RHINO 7 - GRASSHOPPER	80 mm/s h = 10mm 600 PUNTOS RHINO 7 - GRASSHOPPER	65 mm/s h = 3mm 600 PUNTOS RHINO 7 - GRASSHOPPER	40 mm/s h = 3mm 600 PUNTOS RHINO 7 - GRASSHOPPER
CONFIGURACIÓN IMPRESORA	DIAMETRO BOQUILLA TIEMPO IMPRESIÓN	Ø 8mm 20min	Ø 19mm 10min	Ø 8mm 10 min	Ø 6mm 19min
GEOMETRIA MURO	CANTIDAD DE PANELES % IMPRESIÓN	4 84% DESARROLLADO	2 COMPLETADO	3 47% DESARROLLADO	4 37% DESARROLLADO
RESULTADOS	OBSERVACIÓN	Evaluación de trayectorias inclinadas, para evaluar futuras geometrías con modelos de muro y evaluar ventilación de fachada	La impresión con bomba permite un "reciclaje" de material, mientras sea trabajable. Pero presenta la complejidad de la elaboración y alimentación continua a la bomba		Fallo de la primera impresión por fluidez de mezcla al momento de comenzar la impresión, reiniciando el proceso. La impresión queda limitada por el límite de presión de la máquina

2.1.1. Características técnicas del proceso de impresión

La graduación de la presión debe ser muy precisa, cada 5 capas de altura se aumenta la presión entre 1 a 5 psi. con la finalidad de ir supliendo el vacío que se genera en el tanque que suministra la mezcla.

La definición de altura entre capas se debe hacer en función a la humedad de la mezcla y la presión con la cual se va a trabajar. Recomendando definir 1/3 del diámetro de la boquilla de impresión como mínimo.

Los límites de tiempo de impresión quedan definidos principalmente por la presión que puede alcanzar la máquina. Otros factores son la composición de la mezcla y velocidad de impresión.

Para que el extrusor tenga buena capacidad de velocidad en los encuentros o esquinas. deben tener curvas de giro con radios de circunferencia lo más holgado posible, mayor al diámetro de la boquilla.

El diseño de boquilla de 6mm no resulta óptimo para la mezcla y el sistema de inyección, requiere mayor presión para poder extruir el material.

2.1.2. Características Técnicas de Modelos Impresos

La impresión en escala sufre el asentamiento de las primeras capas, lo que no determina necesariamente que ocurra en escala real.

Se deben mantener separaciones entre los paneles del modelo, mayores al diámetro de la boquilla para que queden vanos internos con la capacidad necesaria para el relleno y los cordones se solapen lo suficiente para quedar unidos los paneles.

Trayectorias inclinadas requieren evaluar el diámetro de la boquilla y la inclinación de las curvaturas.

La velocidad de impresión no es representativa para la escalabilidad de impresión a formato 1:1.

2.2. Análisis Resultados

Los muros con mayor capacidad de auto sombreado presentan ciertas complejidades iniciales, ya que los voladizos sobresalen más de la mitad del espesor del muro, sin tener en cuenta la fachada exterior, y carecen de un soporte estructural adecuado para los cordones de base a medida que ascienden. Esta problemática se resuelve mediante la incorporación de un panel interior y la configuración de los paneles de manera que los cordones queden entrelazados.

La capacidad máxima que tienen los elementos de sombreado de la fachada para sobresalir del muro queda determinada por la adherencia entre los cordones inferior y superior, tienen la capacidad de auto soportarse y para ello el ángulo de inclinación no puede ser menor de 35° entre los ejes de las trayectorias, dependerá de cada diseño el valor de este valor.

La incorporación del panel de relleno ayuda a incorporar cavidades para el relleno de aislante, la cual se optimiza con el distanciamiento entre los paneles y reduciendo los puntos de contacto del panel de relleno con los paneles interior y exterior, la trayectoria termina siendo una curvatura menos serpenteante y reduce el tiempo de impresión. En resumen, el desarrollo de 3 paneles o más mejora la posibilidad de reducir la transmitancia térmica gracias a la capacidad de relleno, entre más paneles aumentará la dimensión del muro y requiere un distanciamiento entre los paneles mayor al diámetro de la boquilla.

CAPÍTULO 3. Desempeño Térmico de Muros Impresos en 3D

En base al desarrollo del primer capítulo se logra visualizar como la impresión 3D ha evolucionado al punto de llegar a innovar el mundo de la construcción, pero además requiere una estandarización del proceso, elaboración de informes técnicos y constatar los valores térmicos que aporten al confort habitacional de las edificaciones, mejorando la experiencia del usuario ya sea en construcciones residenciales, lugares de trabajo, esparcimiento, etc. Para ello el capítulo analiza y expone como las características de diferentes zonas climáticas influyen en el resultado al desempeño térmico que entregan los muros.

Dada la creciente adopción a la construcción industrializada, se busca aportar al desarrollo de esta tecnología, más allá de la apreciación de la capacidad de construcción y las geometrías complejas posibles gracias a la impresión 3D. Mediante procedimientos de cálculos detallados de normativas y manuales técnicos, se calculan los valores de transmitancia térmica de los muros con proyección constructiva según los resultados de impresión. Con la información de las estaciones climáticas de las ciudades de Antofagasta, Santiago y Concepción se analizará la capacidad de auto sombreado de los muros, y comprobar la reducción de radiación solar directa recibida por fachada.

Para finalizar se comparan los métodos tradicionales de construcción con los datos obtenidos del nuevo sistema constructivo detallando pros y contras del sistema de impresión 3D.

Las herramientas para el cálculo serán “ClimateStudio”, “AndrewMarsh”, “LadyBug” y “ClimateConsultant”, con las cuales obtener la información del clima, cálculos, procesamiento de información y condicionantes para el diseño de los muros.

Se evaluarán para las estaciones de invierno, primavera y verano, verificando las condiciones de confort, con los datos de cada una de las estaciones según el sistema “ASHRAE Standard 55” y lo indicado en la Calificación energética de edificación.

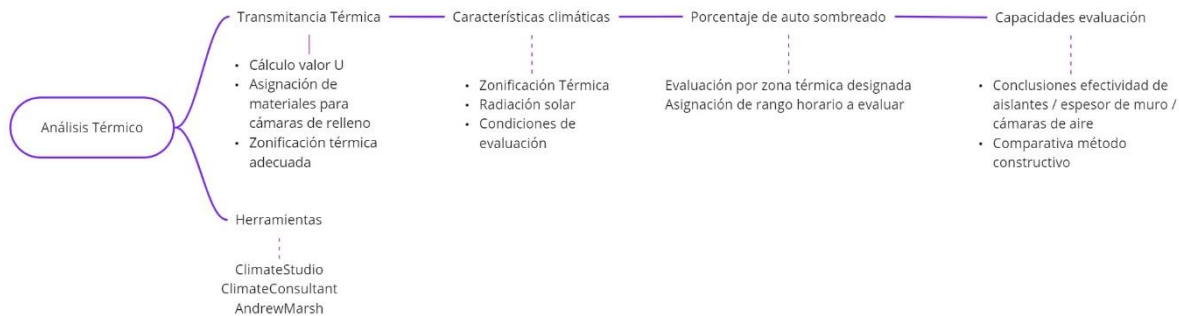


Figura 43. Esquema para el análisis térmico. (Elaboración propia).

3.1. Transmitancia Térmica

Esta etapa evalúa el desempeño del muro respecto a la capacidad de transmitancia térmica, tanto del propio material y aislantes incorporados al interior del muro, de esta evaluación se definirán los parámetros que podrían mejorar el modelo, así como las conclusiones sobre las deficiencias o aspectos a mejorar para la siguiente fase.

En este capítulo se analizan los muros impresos seleccionados en base a su geometría, estructuración y posibilidad de escalabilidad a formato 1:1. Los elementos más relevantes para su elección son los elementos de fachada que pueden generar sombra sobre la fachada y la posibilidad de relleno en los vanos internos de la estructura de muro. Confirmando con la información del desarrollo de prototipos si se mantiene el diámetro de boquilla de diseño o se optimiza con el fin de maximizar la cavidad del muro.

La selección corresponde a los muros impresos en los días 9, 12, 13, 14, 16 y 17. Quedando definido el siguiente sistema de nomenclatura “M_D_F”, donde “M” representa el modelo, “D” el día y “F” la fecha representada en el formato día/mes. Ejemplo, MA_D9_2906.

El procedimiento utilizado para el cálculo de transmitancia térmica está orientado en la NCh853:2021, referenciando los capítulos 5.7.2 “Resistencia térmica total de un componente de edificación constituido por capas homogéneas y heterogéneas”, 5.8 “Resistencias Superficiales”, 5.9 “Resistencia térmica de las capas de aire”.

Los modelos que cumplen con los estándares del “Anexo A-1.a” del “NTM11/2” sobre el “Acondicionamiento Térmico Elementos Opacos” son asignados en la zona térmica a la cual mejor se adaptan. Para el caso en que los modelos no cumplan con los valores mínimos, se ubicarán en la zona con menor exigencia de transmitancia térmica para la etapa siguiente de evaluación: el porcentaje de auto sombreado.

El material de la mezcla esta formulado a partir de Sikacrete-752 3D, con una densidad de 2200Kg/m³ y la conductividad térmica del material es un ponderado de la lista de soluciones constructivas para acondicionamiento térmico, N°42 – Hormigón en masa con áridos ordinarios, sin vibrar. λ : 1.395 W/mK.

El aislante seleccionado es Lana Mineral Granulada con una densidad de 100Kg/m³ y λ : 0.041 W/mK, funciona en todos los contextos climáticos, además de ser óptima para el formato de trabajo, en el que un operador o la misma impresora puede ir incorporando el material dentro de las concavidades del muro.

El valor de transmitancia se calcula con los valores de conductividad térmica (λ) de los materiales que componen el muro, la resistencia superficial y la resistencia térmica de capas de aire con superficies de alta emisividad.

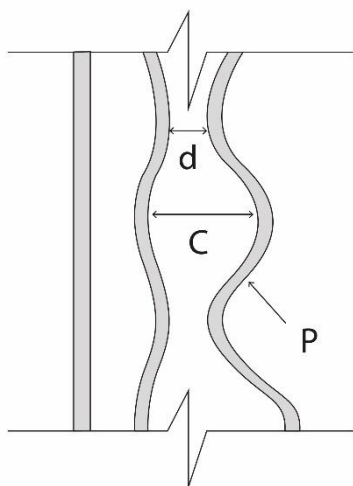
Los rangos de transmitancia térmica quedan definidos por cumplir con un valor U determinado, igual o menor según la siguiente tabla, la que se divide por el tipo de elemento constructivo y zonificación térmica (tabla 6). Las zonas térmicas para analizar son A (Antofagasta), D (Santiago) y E (Concepción).

Tabla 5. Acondicionamiento térmico de elementos opacos, complejo de techumbre, muro, piso y puerta.

Zona Térmica	Complejo de techumbre		Complejo de muro		Complejo de piso		Complejo de puerta	
	U	Rt	U	Rt	U	Rt	U	Rt
	W/(m²K)	(m²K)/W	W/(m²K)	(m²K)/W	W/(m²K)	(m²K)/W	W/(m²K)	(m²K)/W
A	0,84	1,19	2,10	0,48	3,60	0,28	---	---
B	0,47	2,13	0,50	2,00	0,70	1,43	1,00	1,00
C	0,47	2,13	0,80	1,25	0,87	1,15	1,20	0,83
D	0,38	2,63	0,60	1,67	0,70	1,43	1,20	0,83
E	0,33	3,03	0,50	2,00	0,60	1,67	1,00	1,00
F	0,28	3,57	0,45	2,22	0,50	2,00	1,00	1,00
G	0,25	4,00	0,30	3,33	0,32	3,13	1,00	1,00
H	0,28	3,57	0,40	2,50	0,39	2,56	0,80	1,25
I	0,25	4,00	0,35	2,86	0,32	3,13	0,80	1,25

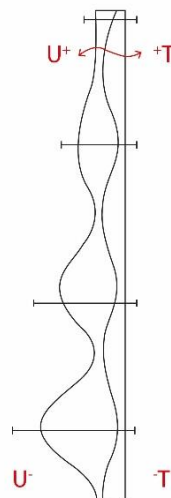
Referencia: Manual NTM 11 / 2, Anexo A.

El muro como se muestra en la figura 44, se compone de paneles distanciados entre ellos según cada modelo, lo que genera las cavidades internas, de las cuales se plantea queda con cámaras de aire estancas y otras con relleno aislante.



d: Distancia entre paneles
P: Paneles (Interior, relleno, exterior)
C: Cavidad de muro

Figura 45. Sección de los elementos componentes del muro. (Elaboración propia).



Métodos de cálculo
de transmitancia

Figura 44. Sección del muro para cálculo de la transmitancia térmica. (Elaboración propia).

El procedimiento de cálculo para obtener el valor de transmitancia térmica es el siguiente (Figura 45), el muro es cortado por capas y es seccionado por las variaciones de dimensión de las curvaturas del muro, cada sección se replica en todos los cortes realizados. Luego se realiza el cálculo por cada corte y son promediadas cada sección de todos los cortes, terminando de establecer el promedio del total del muro, con el cálculo realizado previamente de las secciones.

El método de cálculo y obtención del valor de transmitancia térmica se guía de la Nch853:2021, para la formulación en esta memoria, es la siguiente.

$$R_t = (R_{m1} + R_{m2} + R_{si} + R_{se} + R_{air}) ; R_{tot} = \frac{R_{t1} + R_{t2} + \dots + R_{tx}}{N \text{ cantidad de } R_t} ; U = \frac{1}{R_{tot}}$$

Donde:

R_t : Resistencia térmica en m^2K/W / R_m : Resistencia del material / R_{si} : Resistencia superficial interior / R_{se} : Resistencia superficial exterior / R_{tot} : Resistencia térmica total / $R_{t n^\circ}$: Resistencia térmica de una sección del corte / $N R_t$: Cantidad de $R_{t n^\circ}$ de la sección completa del muro / U : Transmitancia térmica en W/m^2K .

En el anexo de esta memoria se adjuntan los procedimientos de cálculo, hojas de cálculo, planimetría y los datos recopilados de cada muro.

MA_D9_2906

El siguiente modelo de muro contiene entre sus paneles de interior a exterior dos cavidades con aire estanco y una con el uso de lana mineral granulada.

Los resultados de transmitancia térmica promediada entrega valor **$U = 0.51 \text{ W/m}^2\text{K}$** . Queda dentro de rango de análisis en las zonas térmicas A, C, D, quedando ubicado en zona térmica E (NTM11/2) para el análisis de sombras.

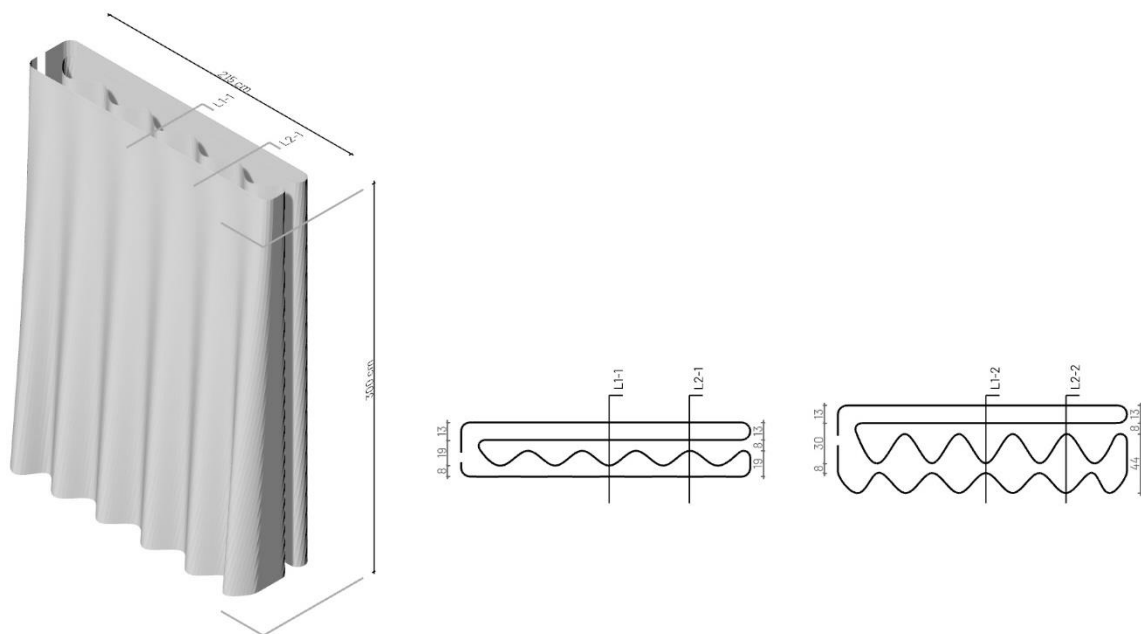


Figura 46. Imagen y secciones del muro MA_D9_2906 para el cálculo de Transmitancia Térmica.

MA_D12_2707

El siguiente modelo de muro contiene entre sus capas de interior a exterior dos vacíos con aire estanco y una con el uso de lana mineral granulada.

Los resultados de transmitancia térmica promediada entrega valor **$U = 1.10 \text{ W/m}^2\text{K}$** . Quedando asociado al análisis en la zona térmica A, sin cumplir a las zonas seleccionadas se plantea, a modo de estudio se planteará evaluar la proyección de sombras para la zona térmica A (NTM11/2).

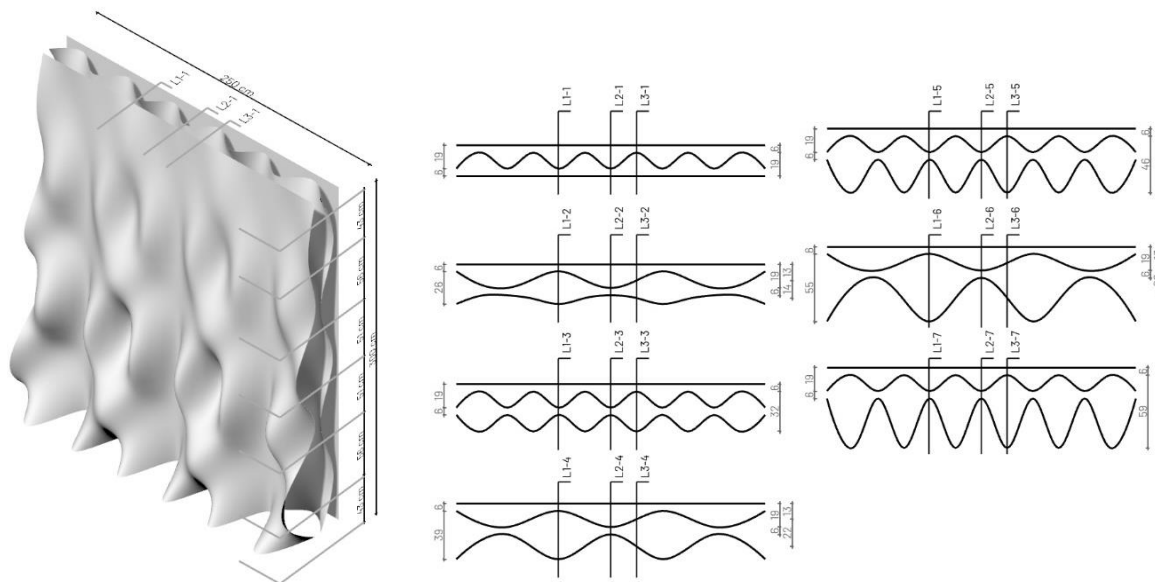


Figura 47. Imagen y secciones del muro MA_D12_2707 para el cálculo de Transmitancia Térmica.

MB_D12_2707

El siguiente modelo de muro contiene entre sus capas de interior a exterior una cavidad con aire estanco y la otra con el uso de lana mineral granulada, este modelo fue impreso en boquilla de 6mm.

Los resultados de transmitancia térmica promediada entrega valor **$U = 1.16 \text{ W/m}^2\text{K}$** . Quedando asociado al análisis en la zona térmica A, sin cumplir a las zonas seleccionadas se plantea a modo de estudio para la zona térmica A (NTM11/2) para el análisis de sombras.

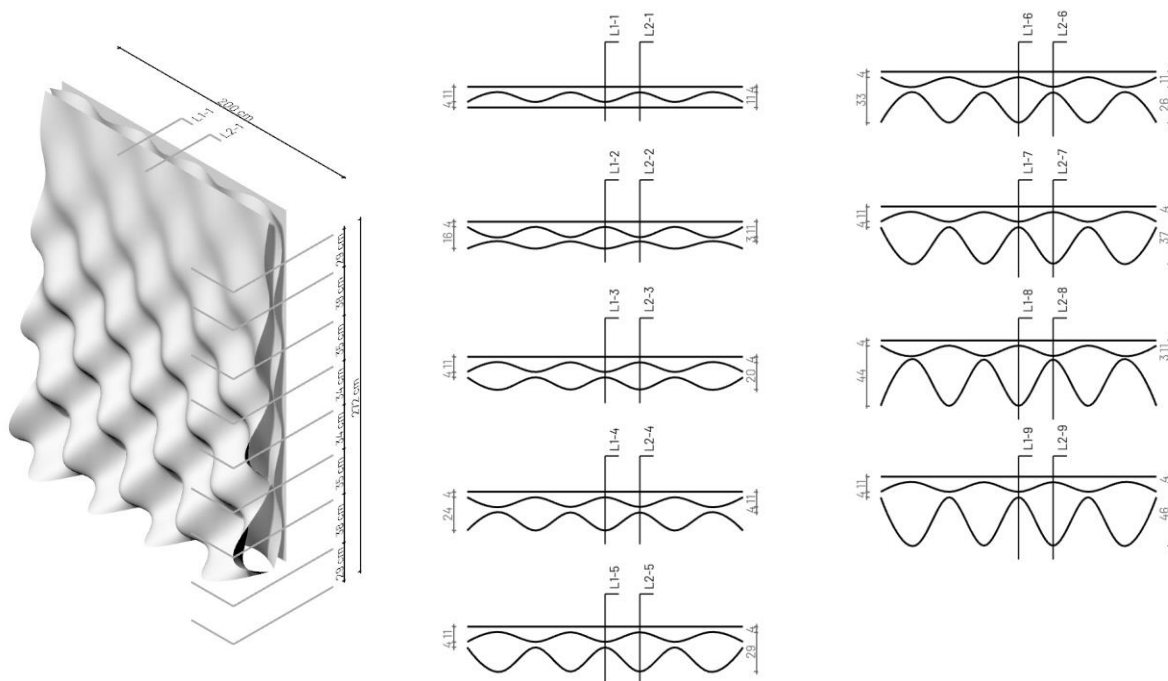


Figura 48. Imagen y secciones del muro MB_D12_2707 para el cálculo de Transmitancia Térmica.

MD_D13_0208

El siguiente modelo de muro contiene entre sus capas de interior a exterior una cavidad con aire estanco y la otra con el uso de lana mineral granulada, este modelo fue impreso en boquilla de 8mm.

Los resultados de transmitancia térmica ponderada entrega valor **$U = 1.07 \text{ W/m}^2\text{K}$** . Quedando asociado al análisis en la zona térmica A, sin cumplir a las zonas seleccionadas se plantea a modo de estudio para la zona térmica D (NTM11/2) para el análisis de sombras.

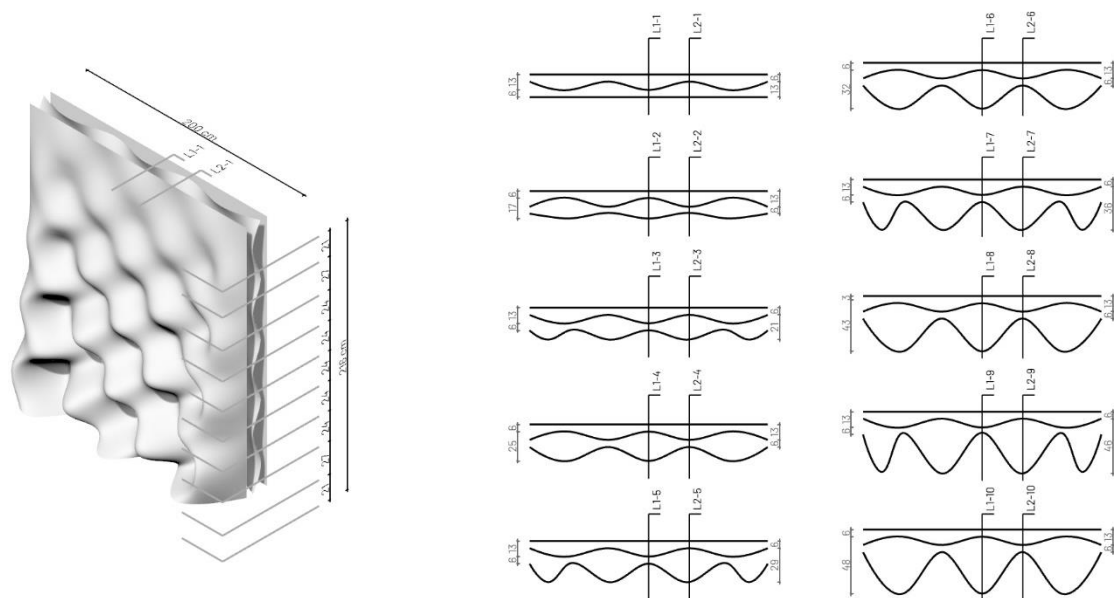


Figura 49. Imagen y secciones del muro MD_D13_0208 para el cálculo de Transmitancia Térmica.

ME_D13_0208

El siguiente modelo de muro contiene entre sus capas de interior a exterior una cavidad con aire estanco y la otra con el uso de lana mineral granulada, este modelo fue impreso en boquilla de 8mm.

Los resultados de transmitancia térmica promediada entrega valor $U = 0.88 \text{ W/m}^2\text{K}$. Quedando asociado al análisis en la zona térmica A, sin cumplir a las zonas seleccionadas se plantea a modo de estudio para la zona térmica D (NTM11/2) para el análisis de sombras.

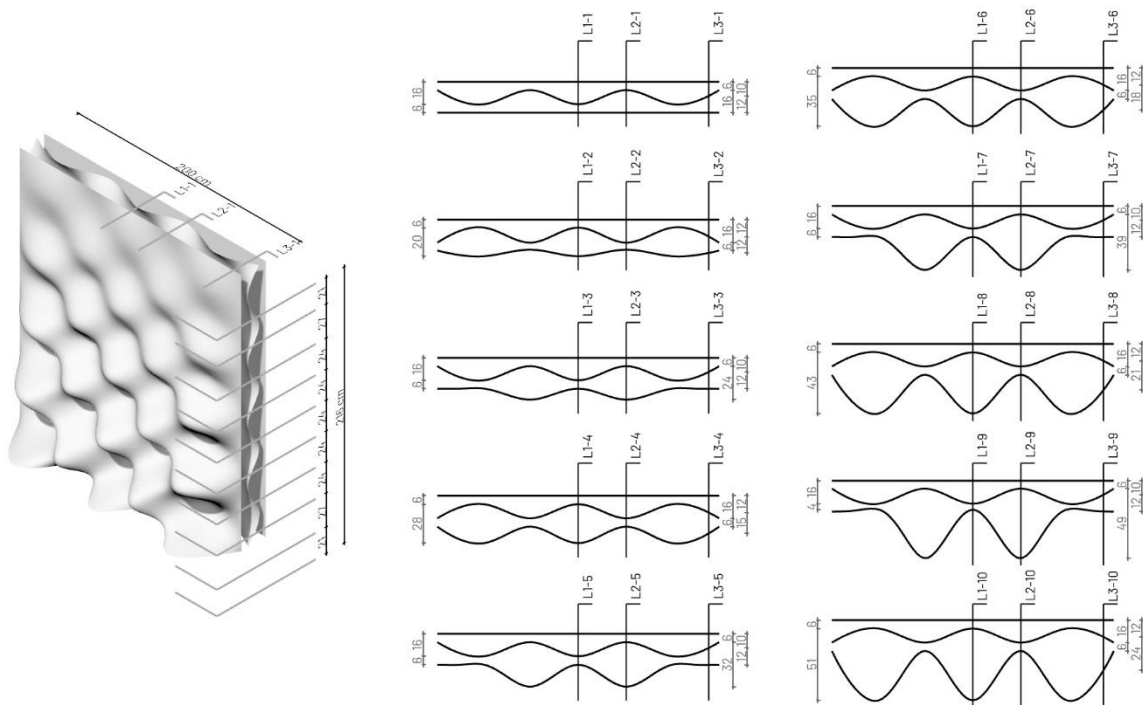


Figura 50. Imagen y secciones del muro ME_D13_0208 para el cálculo de Transmitancia Térmica.

MA_D14_1108

Dada la falta de cámaras de aire por sus dimensiones, se analiza la configuración con el siguiente orden de izquierda (fachada interior) a derecha (fachada exterior); aire-aire-aislante / aislante-aire-aislante

Los resultados de transmitancia térmica promediada entrega valor **$U = 1.02 \text{ W/m}^2\text{K}$** para la primera configuración y **$U = 0.66 \text{ W/m}^2\text{K}$** para la segunda configuración. Quedando asociado al análisis en la zona térmica A y C, sin cumplir a las zonas seleccionadas se plantea a modo de estudio para la zona térmica D (NTM11/2) para el análisis de sombras.

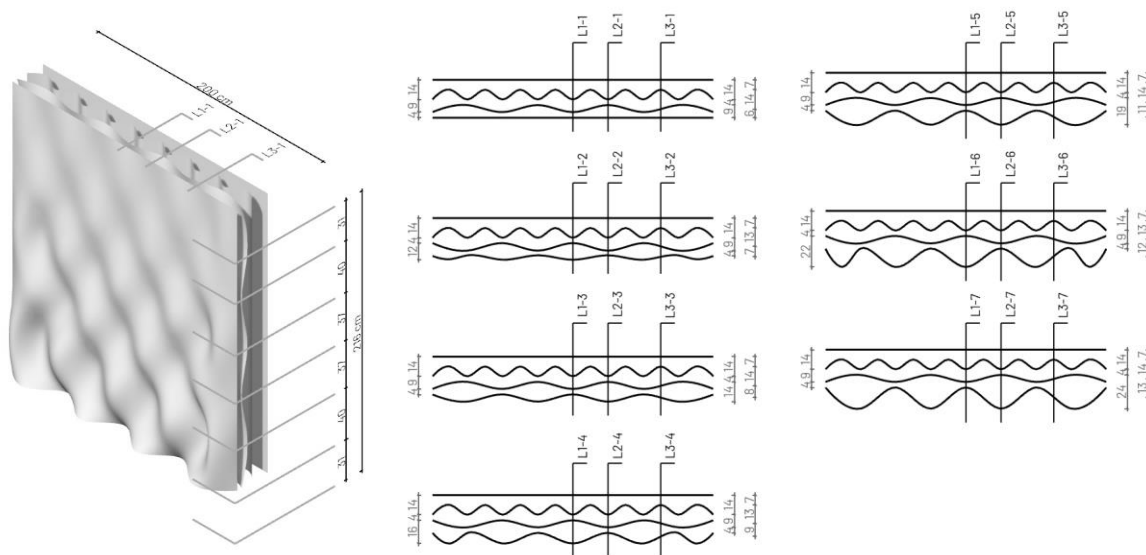


Figura 51. Imagen y secciones del muro MA_D14_1108 para el cálculo de Transmitancia Térmica.

MB_D14_1108

Con el fin de que los vanos interiores del muro queden bien definidos y poder dar más capacidad al material de relleno se utiliza boquilla de 5cm. se analiza la configuración con el siguiente orden de izquierda (fachada interior) a derecha (fachada exterior); aire-aire-aislante / aislante-aire-aislante.

Los resultados de transmitancia térmica promediada entrega **valor $U = 0.66 \text{ W/m}^2\text{K}$** para la primera configuración y **$U = 0.29 \text{ W/m}^2\text{K}$** para la segunda configuración. Quedando asociado el primero al análisis en la zona térmica A y C, el segundo cumple en todas las zonas térmicas, se plantea a modo de estudio para la zona térmica E (NTM11/2) para el análisis de sombras.

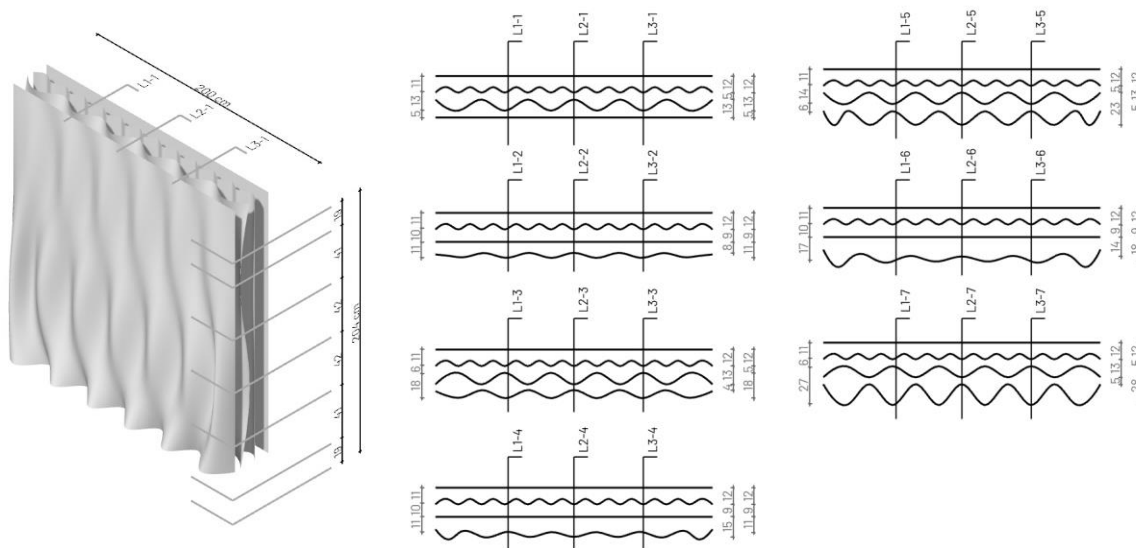


Figura 52. Imagen y secciones del muro MB_D14_1108 para el cálculo de Transmitancia Térmica.

MA_D16_0109

Se realizan dos evaluaciones para analizar el cambio de transmitancia al reducir el espesor de muro, para aumentar la cavidad interna del muro, la configuración es una cámara de aire y aislante térmico hacia el exterior.

Los resultados de transmitancia térmica promediada entrega valor $U = 1.05 \text{ W/m}^2\text{K}$. para la boquilla de 8cm y con boquilla de 6cm el resultado $U = 1.13 \text{ W/m}^2\text{K}$. Quedando asociado el primero al análisis en la zona térmica A, para poder evaluar la sombra, este modelo presenta las características de diseño para ser evaluado en la zona térmica E (NTM11/2).

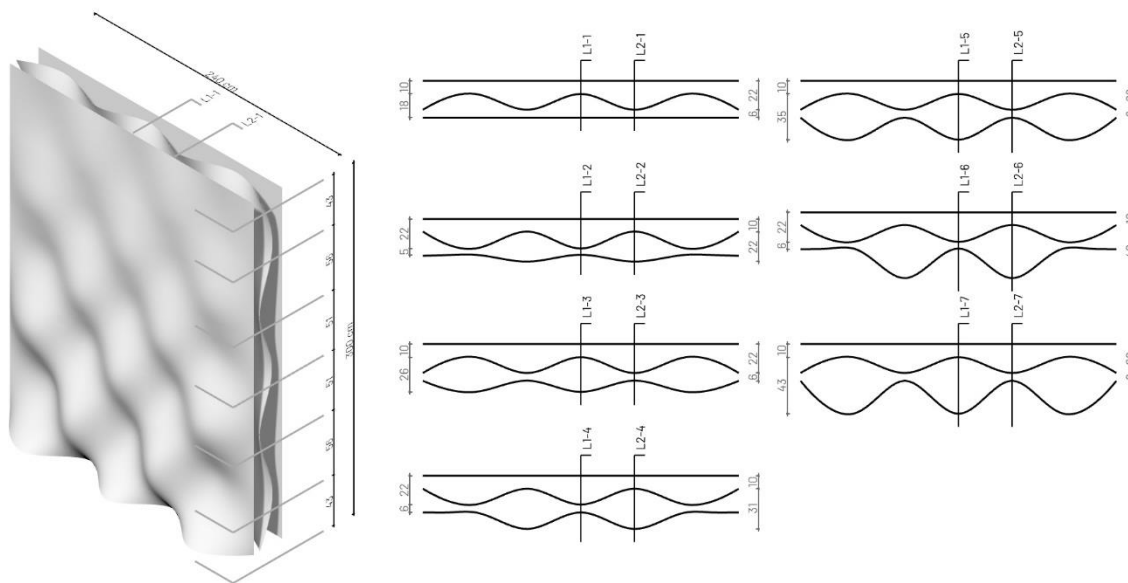


Figura 53. Imagen y secciones del muro MA_D16_0109 para el cálculo de Transmitancia Térmica.

MB_D17_0809

Para estos modelos se planteará el cálculo con una boquilla de 4cm, con el fin de que los vanos interiores del muro queden más definidos y poder dar más capacidad al material de relleno. El cálculo de este modelo contempla el cálculo por tramo de cada corte y multiplicado por la cantidad detallada en las plantas del corte, los resultados de transmitancia térmica promediada entrega valor **$U = 3.11 \text{ W/m}^2\text{K}$** . Sin cumplir a las zonas seleccionadas se plantea a modo de estudio para la zona térmica A (NTM11/2) para el análisis de sombras.

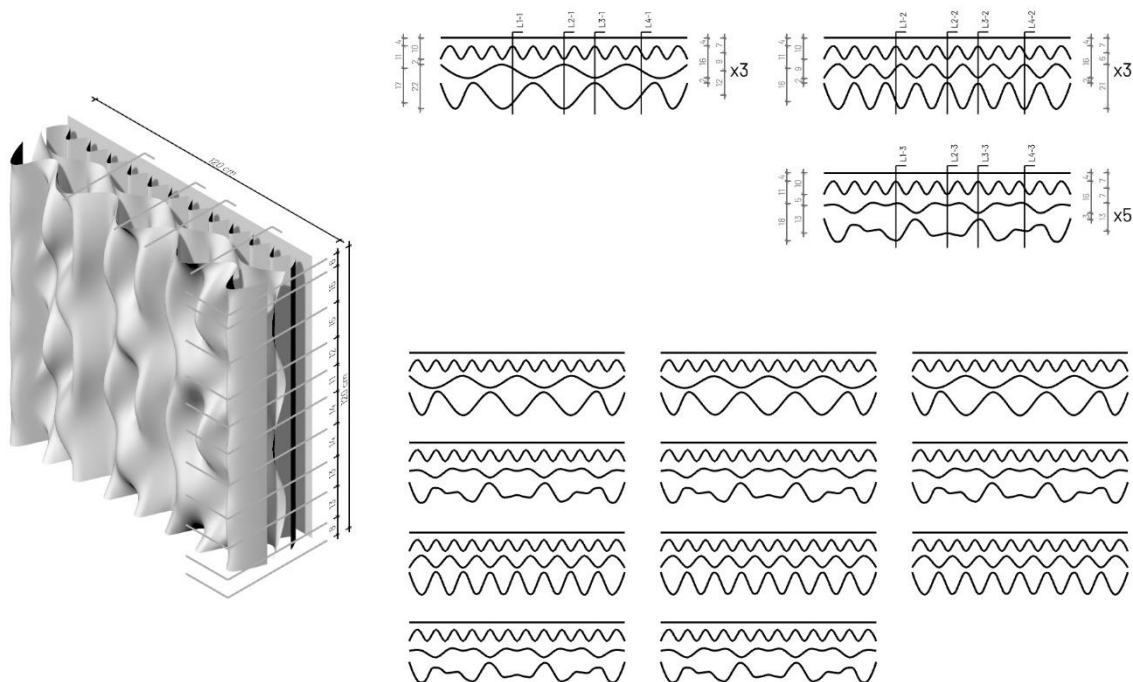


Figura 54. Imagen y secciones del muro MB_D17_0809 para el cálculo de Transmitancia Térmica.

3.1.1. Análisis Resultados

Tabla 6. Resumen cumplimiento de muros a zonificación térmica.

MA_D9

MA_D12

MB_D12

MD_D13

ME_D13

MA_D14

MB_D14

MA_D16

MB_D17

ZONA A U = 2.10	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	-
ZONA B U = 0.50	-	-	-	-	-	-	CUMPLE	-	-
ZONA C U = 0.80	CUMPLE	-	-	-	-	CUMPLE	CUMPLE	-	-
ZONA D U = 0.60	CUMPLE	-	-	-	-	-	CUMPLE	-	-
ZONA E U = 0.50	-	-	-	-	-	-	CUMPLE	-	-
ZONA F U = 0.45	-	-	-	-	-	-	CUMPLE	-	-
ZONA G U = 0.30	-	-	-	-	-	-	CUMPLE	-	-
ZONA H U = 0.40	-	-	-	-	-	-	CUMPLE	-	-
ZONA I U = 0.35	-	-	-	-	-	-	CUMPLE	-	-

33% de los modelos desarrollados cumplen los requisitos para su empleo en más de dos zonificaciones térmicas, solo el modelo MB_D17 no logra el valor de corte para su empleo, esto dada la complejidad geométrica del muro y lo aflautado de las cavidades internas, quedando solo algunas secciones con una baja transmitancia térmica 0.21W/m²K (sección 4, corte 2). Lo que aumenta el valor de transmitancia del modelo es la tercera sección de cada muro, esta sección queda solo con cámaras de aire entre las primeras dos cavidades y donde se plantea el aislante térmico no hay espacio para su incorporación.

Nota: Se define la selección en otras zonas de evaluación para interpretar los datos en las demás zonas propuestas. Los diagramas en naranja son la zona en la que se evaluará el porcentaje de sombra.

MA_D16 Se evalúa con dos diámetros de boquilla, siendo el de mayor diámetro el que entrega una menor transmitancia térmica. Lo que contradice un poco la lógica y que, en este caso, el mayor espesor que puede abarcar la mezcla debiese reducir el valor U total del muro. Condición que no siempre se va a cumplir ya que dependerá de la geometría del muro, la cavidad que sea rellena con el aislante y el eje de corte que sea utilizado para realizar los cálculos.

La separación de panel exterior y relleno es de 6cm, entre el interior y relleno 10cm, a esta distancia se resta el espesor de la boquilla de impresión, por lo cual entre más es la separación, más capacidad de relleno en las cavidades del muro. Relevante es destacar que los valores de transmitancia se reducen mucho si se opta por rellenar las cavidades con aislante térmico, como ocurre en la comparativa de los muros del día 14. Comprobando la mejora del muro entre mayor aislante puede contener en su interior.

A mayor es el distanciamiento entre los paneles del muro, mayor es el área de vacío dentro del muro, lo que se traduce en tener mayor relleno. La cantidad de vanos internos no servirá si la dimensión es muy reducida para que el distanciamiento entre los paneles sea como mínimo del diámetro de la boquilla.

Las complicaciones de la cantidad de paneles que arman el muro son las limitadas aplicaciones de este tipo de solución, quedando restringidas en el mayor de los casos para las viviendas.

Finalmente, lo que define un valor de transmitancia alto o bajo, queda determinado por la separación entre los paneles, el diámetro del extrusor que a su vez define el espesor de los paneles del muro. Las geometrías más complejas tienden también a tener valores U más elevados.

3.1.2. Comparativa Desempeño Térmico

En este apartado se aborda la comparativa del desempeño térmico entre prototipos de muros impresos en 3D y muros de hormigón tradicionales. Se establecen las cualidades de ambos sistemas constructivos, analizando cuál de ellos presenta un mejor rendimiento, ya sea por su diseño, la incorporación de materiales aislantes o la geometría de los muros.

Con el objetivo de comparar el desempeño del sistema tradicional de construcción de muros de hormigón armado, se evaluarán con su similar en dimensión los modelos previos con el mejor y peor resultado. Determinando de este modo cual sistema de desarrolla mejor.

El primer resultado que se presenta a simple vista entre ambos sistemas es la reducción de material a utilizar para lograr el mismo espesor. Otra característica es que el material de relleno no tiene las mismas propiedades de conductividad térmica del que puede ocupar el muro de hormigón armado v/s el muro impreso.

Se realizará la evaluación con los resultados de los modelos que tienen los niveles más bajos y altos de transmitancia térmica, para poder establecer una comparativa con otro diseño.

Los modelos de evaluación son MB_D12 / MB_D14 y sus comparativas en dimensión a cada uno de los modelos.

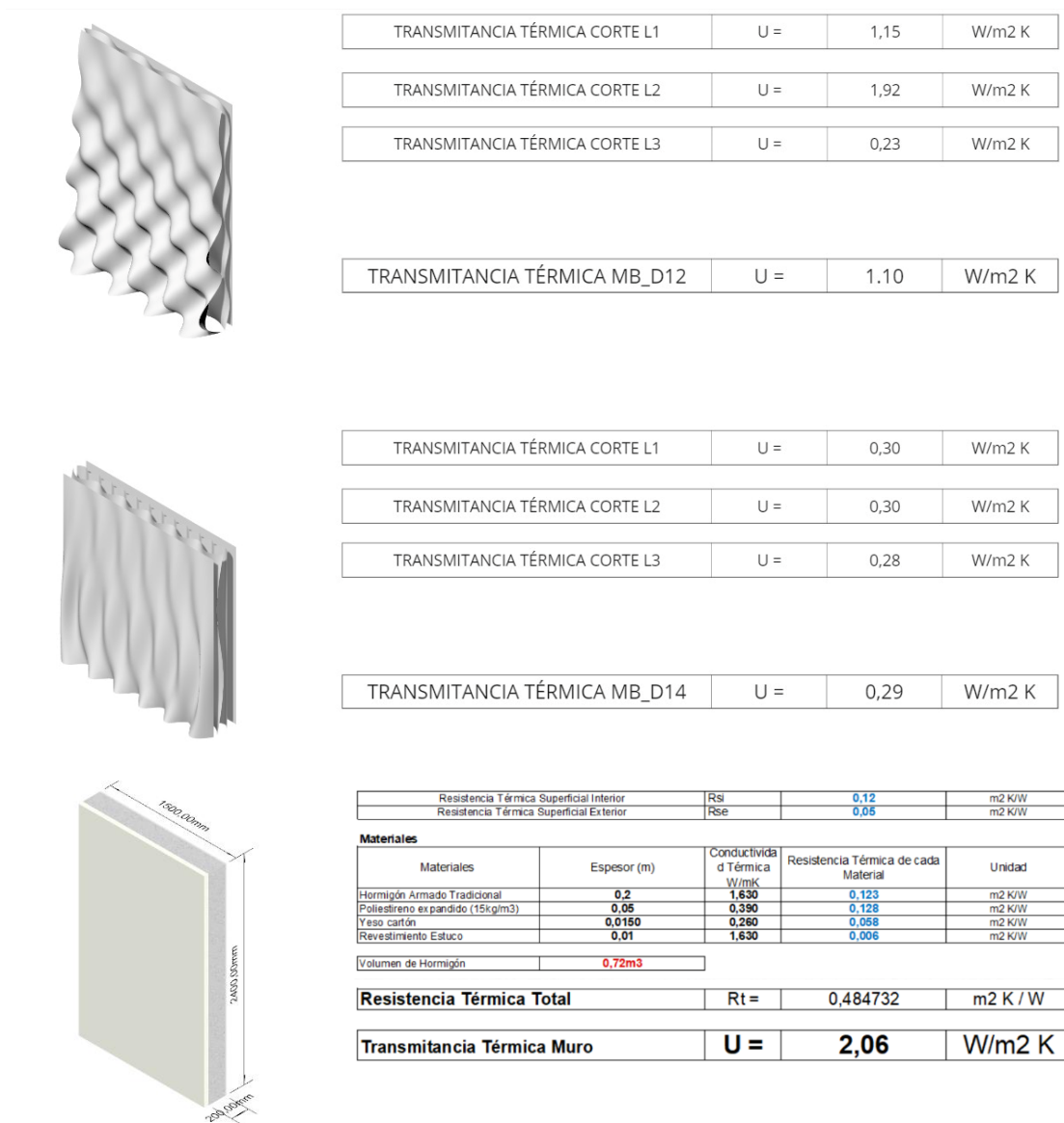


Figura 55. Comparativas de transmitancia térmica entre muros impresos 3D y muro de construcción tradicional.

3.2. Información Climática Ciudades

A continuación, se presentan las características climáticas de las ciudades seleccionadas para evaluar la capacidad de auto sombreado de las fachadas de los muros, verificando la capacidad de cada muro según la zona térmica asignada.

La información incorporada en este apartado es obtenida de los archivos climáticos de las estaciones climáticas para las zonas de estudio, Antofagasta, Santiago y Concepción.

Los datos son procesados y visualizados con el software “ClimateConsultant” y “AndrewMarsh” del cual se presentan cartas psicrométricas, rangos de confort a modo de esclarecer las condiciones de habitabilidad, cartas de radiación solar incidente, la que permite evaluar según la temporada del año los valores máximos y mínimos de radiación, la cual es de guía para establecer las fechas de evaluación determinando los porcentajes ahorrados por cada fachada (reducción de radiación) y prototipo de muro óptimos para cada ciudad.

Se agregan las recomendaciones de diseño pasivo, el cual está basado en los criterios “ASHRAE 55” para cada una de las ubicaciones, y determinar cómo encajan dentro de estas recomendaciones los prototipos en estudio.

La información se utilizar para establecer los rangos horarios y fechas con los valores de radiación máximo incidente y los valores de temperatura por en la fachada por ciudad y orientación. Definiendo un esquema o matriz de datos para determinar en el análisis de porcentaje de sombra los valores ahorrados de radiación.



Figura 56. Esquema información climática. (Elaboración propia).

Antofagasta

Los datos de información de las cartas cartesianas muestran los requerimientos de sombra y asoleamiento en el periodo de verano e invierno, según el rango horario y la orientación del muro. Enfocando el estudio de sombras para los horarios que tengan mayor exposición a temperaturas elevadas.

Mostrando para las fechas seleccionadas 1037 horas solicita sombreado como aporte al confort climático $>20^{\circ}\text{C}$. Sin tener horas en las que el sombreado sea un requisito. Focalizando para verano e invierno los días que aporta el sombreado.

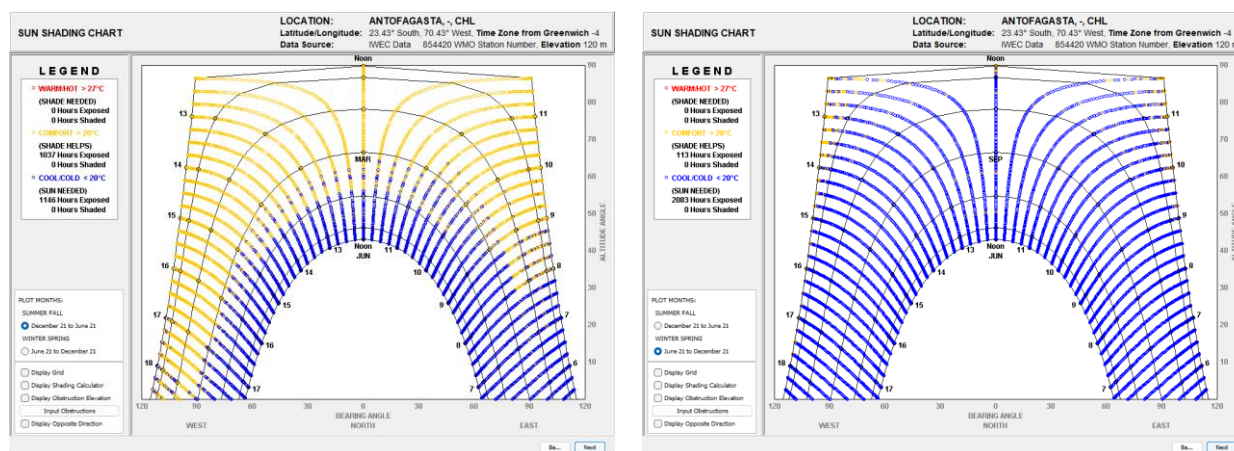


Figura 57. Imágenes de pantalla, asoleamiento en solsticios y equinoccios de la ciudad de Antofagasta, Chile. Periodos diciembre a junio y diciembre a junio. Generadas a partir del software Climate Consultant 6.

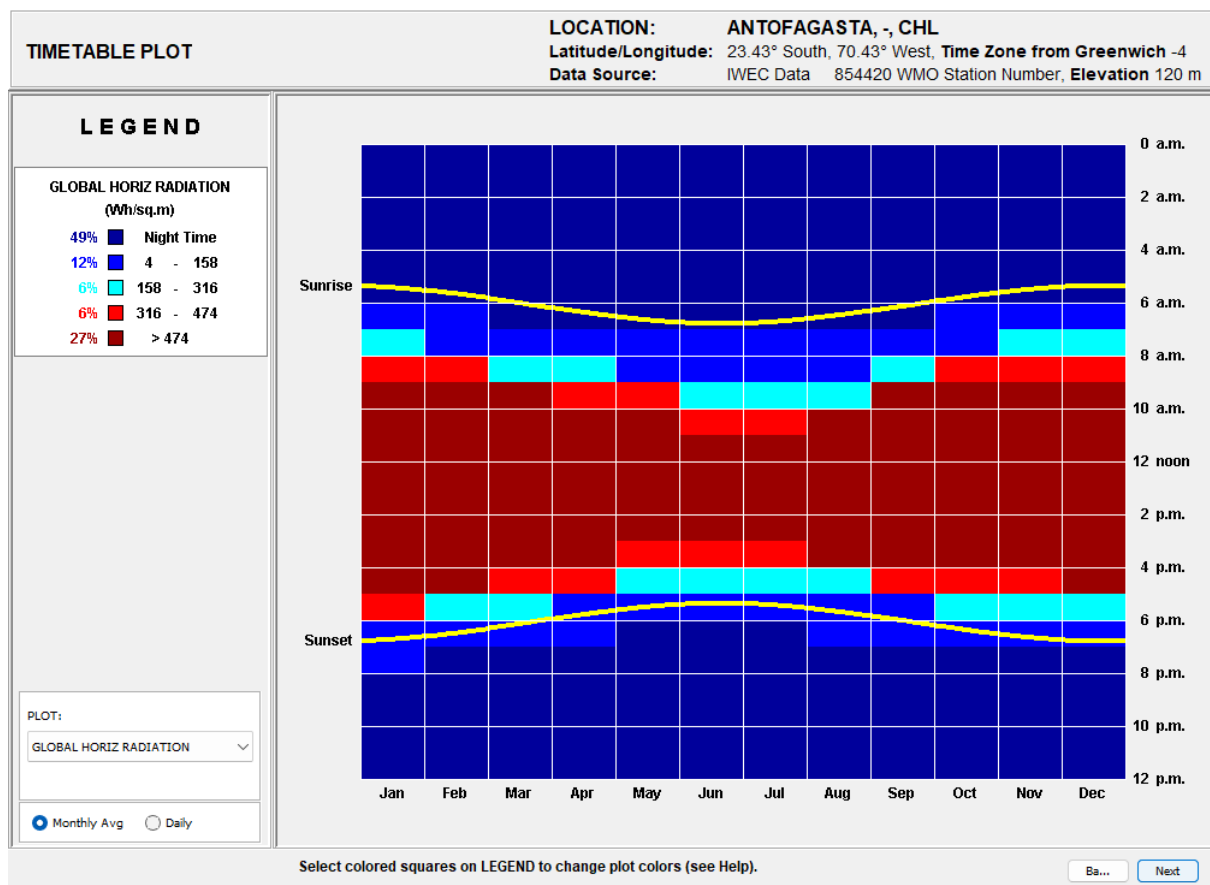


Figura 58. Gráfico de radiación global horizontal anual en la ciudad de Antofagasta, Chile. Generados a partir del software Climate Consultant 6.

Los rangos a evaluar quedan definidos para los solsticios de verano e invierno, y equinocio de primavera, evaluando modelar al día con mayor y menor radiación global horizontal.

Invierno: 9am / 13pm / 16pm – Primavera: 8am / 13pm / 17pm – Verano: 8am / 12pm / 17pm.

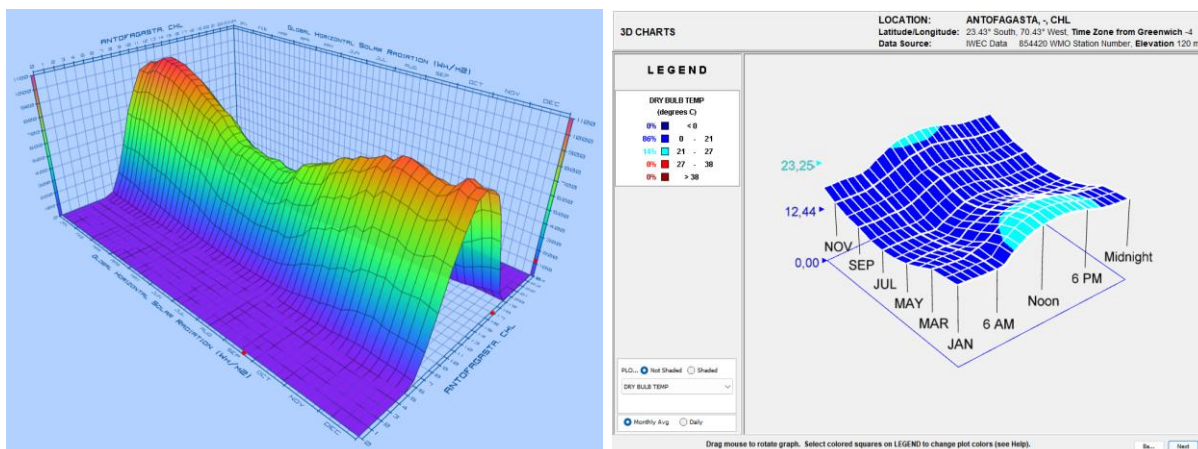


Figura 59. Imágenes de pantalla de gráficos 3D de radiación global horizontal de la ciudad de Antofagasta, Chile. Izquierda AndrewMarsh, derecha Climate Consultant 6.

El valor de radiación global horizontal máximo es de 1070 Wh/m², dentro de un 19% de los valores más elevados (>474 Wh/m²). Los rangos de temperatura con mayor cantidad de veces en el año fluctúan entre 0-21°C con un 79%, con la variable de temperatura más alta 29.2°C con el 6% entre 27-38°C, de media mensual.

Se evaluarán los rangos de hora en los que la radiación solar es más elevada, para el verano, 28 de febrero, 8am para fachada oriente con 390 Wh/m², a las 12pm para fachada norte con un valor de 1070 Wh/m², y a las 17pm para fachada poniente con 330 Wh/m².

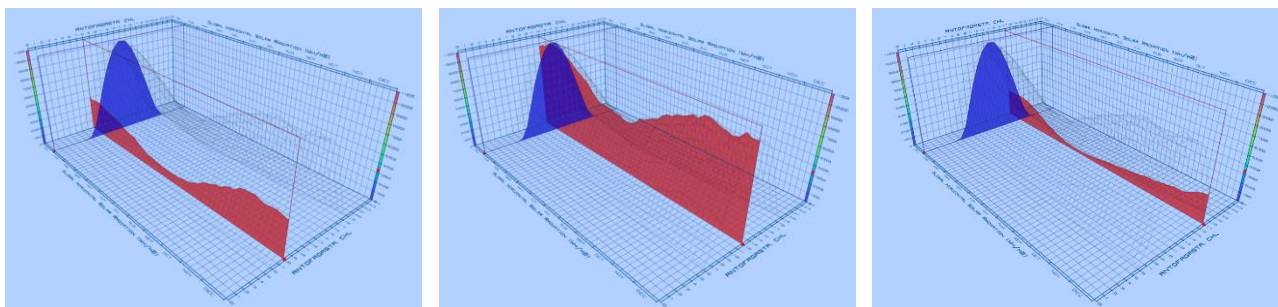


Figura 60. Secciones de gráfico de radiación solar, mañana, medio día y tarde en la ciudad de Antofagasta, Chile. 28 febrero. Imagen de pantalla extraída de AndrewMarsh.

En invierno el valor máximo alcanzado de radiación solar es el día 21 de junio, a las 9 de la mañana para la fachada oriente con 270 Wh/m^2 . a las 13 de la tarde para fachada norte con 600 Wh/m^2 . y 16 horas para la fachada poniente con 175 Wh/m^2 .

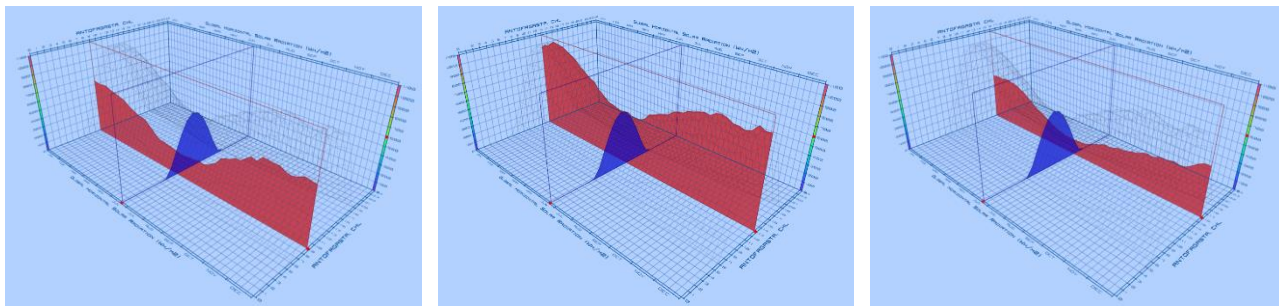


Figura 61. Secciones de gráfico de radiación solar, mañana, medio día y tarde en la ciudad de Antofagasta, Chile. 21 junio. Imagen de pantalla extraída de AndrewMarsh.

Para el equinoccio de primavera, el 21 de septiembre, a las 8 am para fachada oriente con 280 Wh/m^2 , a las 13pm para fachada norte con 850 Wh/m^2 y a las 17pm para fachada poniente 130 Wh/m^2 .

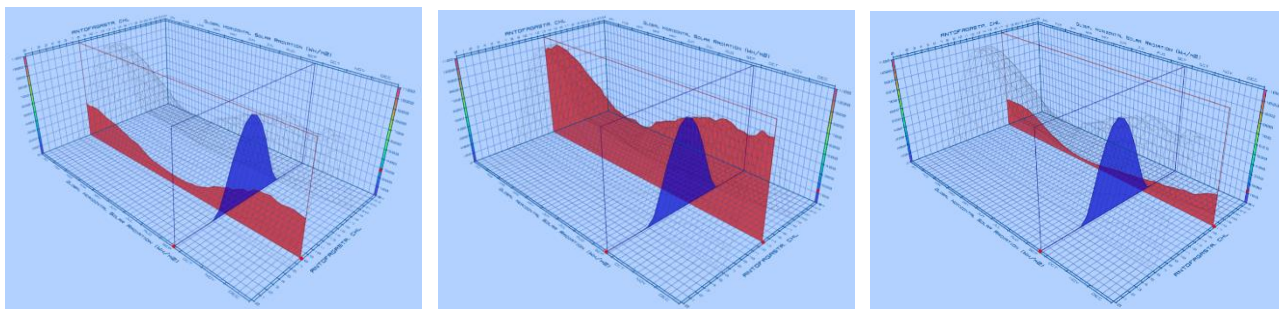


Figura 62. Secciones de gráfico de radiación solar, mañana, medio día y tarde en la ciudad de Antofagasta, Chile. 21 septiembre. Imagen de pantalla extraída de AndrewMarsh.

Santiago

Analizando los valores de los rangos de las cartografías de sombra, para la temporada de verano necesita 482 horas a lo largo del año, mostrando los valores máximos de temperatura y requerimiento de sombra entre septiembre y diciembre.

Para invierno la necesidad de sombra requiere 144 horas, asignando en junio el periodo para evaluar si la inclinación solar logra incidir en la fachada, disminuyendo el porcentaje de sombra que se auto proyecta el muro.

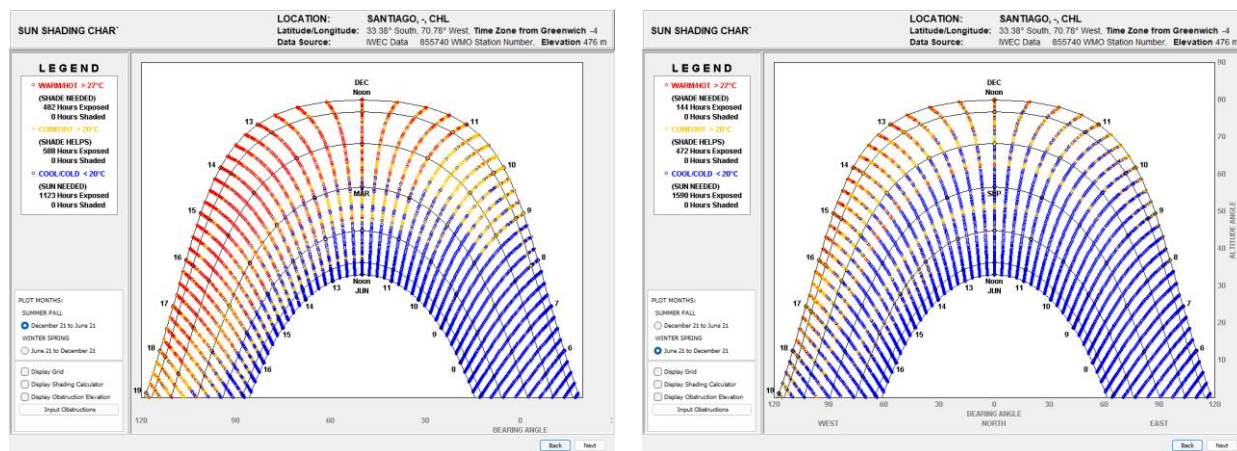


Figura 63. Imágenes de pantalla, asoleamiento en solsticios y equinoccios de la ciudad de Santiago, Chile. Periodos diciembre a junio y diciembre a junio. Generadas a partir del software Climate Consultant 6.

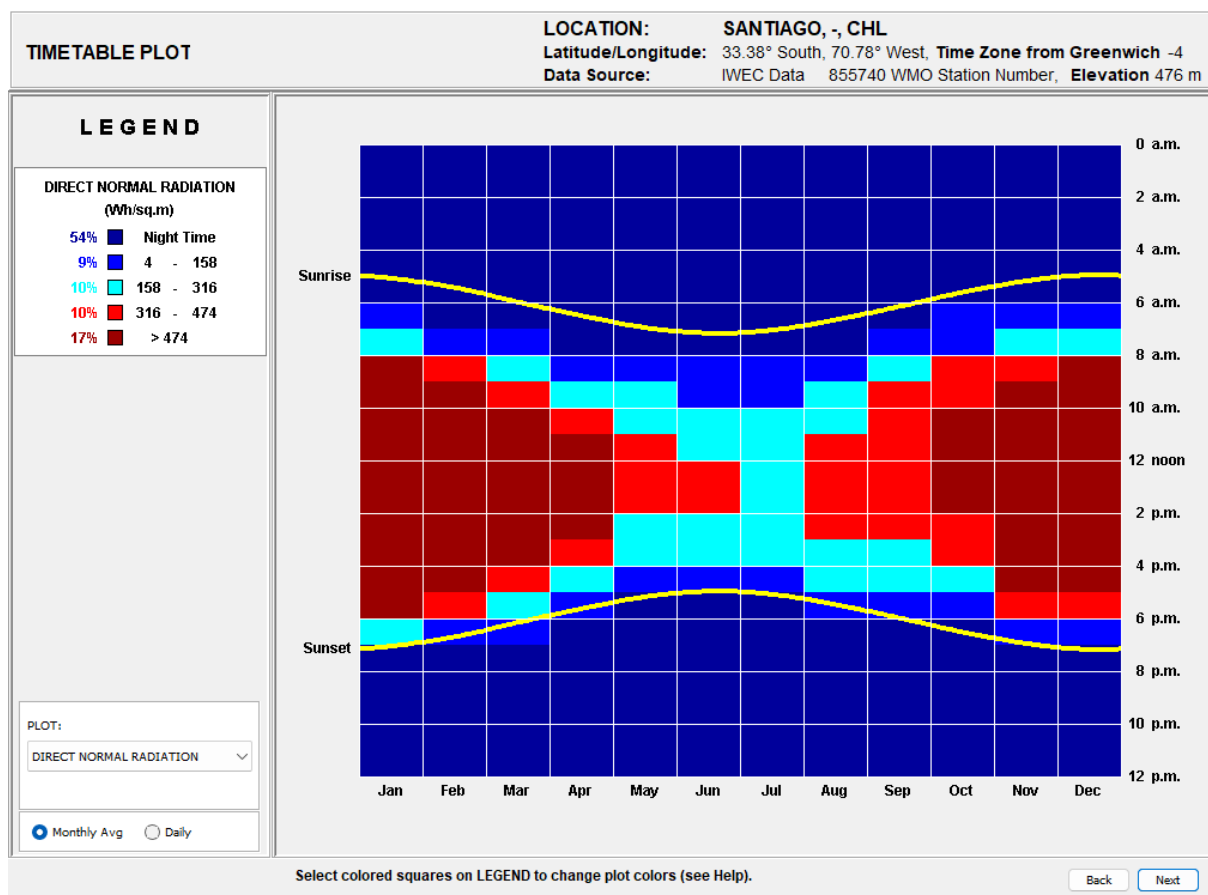


Figura 64. Gráfico de radiación global horizontal anual en la ciudad de Santiago, Chile. Generados a partir del software Climate Consultant 6.

Los rangos a evaluar quedan definidos para los solsticios de verano e invierno, y equinoccio de primavera, evaluando modelar al día con mayor y menor radiación global horizontal.

Invierno: 10am / 13pm / 16pm – Primavera: 9am / 13pm / 17pm – Verano: 8am / 12pm / 17pm.

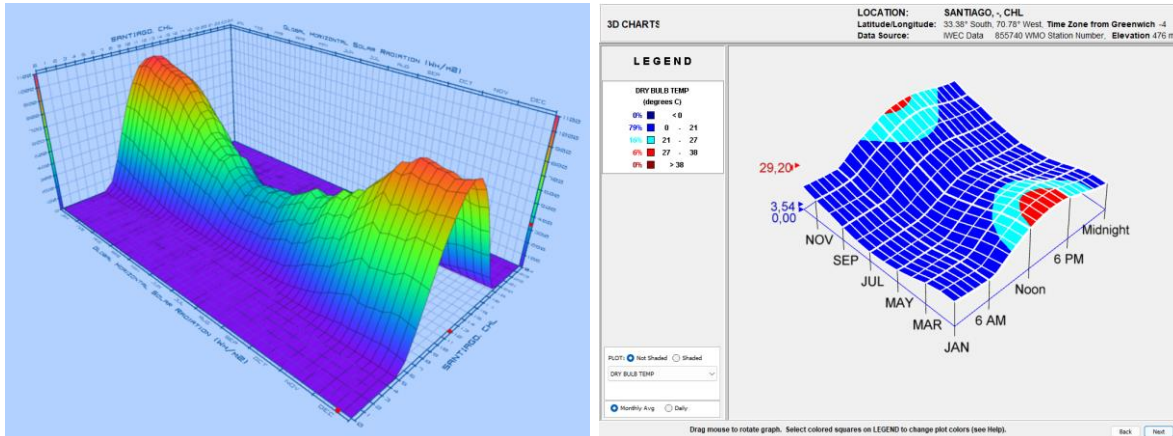


Figura 65. Imágenes de pantalla de gráficos 3D de radiación global horizontal de la ciudad de Santiago, Chile. Izquierda AndrewMarsh, derecha Climate Consultant 6.

El valor de radiación global horizontal máximo es de 1050 Wh/m^2 , dentro de un 19% de los valores más elevados ($>474 \text{ Wh/m}^2$). Los rangos de temperatura con mayor cantidad de veces en el año fluctúan entre $0-21^\circ\text{C}$ con un 79%, con la variable de temperatura más alta 29.2°C con el 6% entre $27-38^\circ\text{C}$, de media mensual.

Se evaluarán los rangos de hora en los que la radiación solar es más elevada, para solsticio de verano, 21 de diciembre, 8am para fachada oriente con 490 Wh/m^2 , a las 12pm para fachada norte con un valor de 1005 Wh/m^2 , y a las 17pm para fachada poniente con 340 Wh/m^2 .

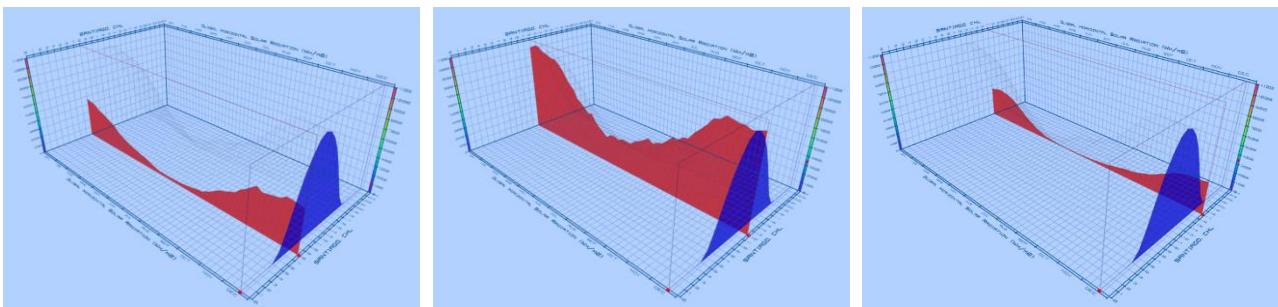


Figura 66. Secciones de gráfico de radiación solar, mañana, medio día y tarde en la ciudad de Santiago, Chile. 21 diciembre. Imagen de pantalla extraída de AndrewMarsh.

En invierno el valor máximo alcanzado de radiación solar es el día 04 de junio, a las 10 de la mañana para la fachada oriente con 200 Wh/m². a las 13 de la tarde para fachada norte con 280 Wh/m². y 16 horas para la fachada poniente con 70 Wh/m².

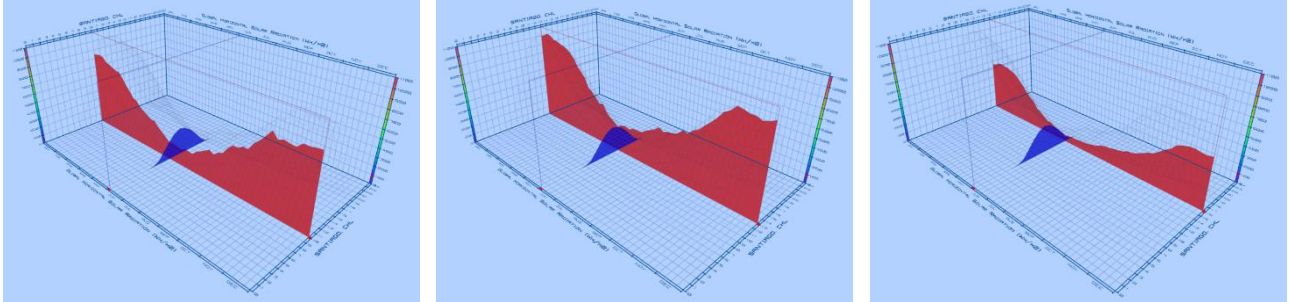


Figura 67 Secciones de gráfico de radiación solar, mañana, medio día y tarde en la ciudad de Santiago, Chile. 04 junio. Imagen de pantalla extraída de AndrewMarsh.

Para el equinoccio de primavera, el 21 de septiembre, a las 9 am para facha oriente con 380 Wh/m², a las 13pm para fachada norte con 365 Wh/m² y a las 17pm para fachada poniente 90 Wh/m²

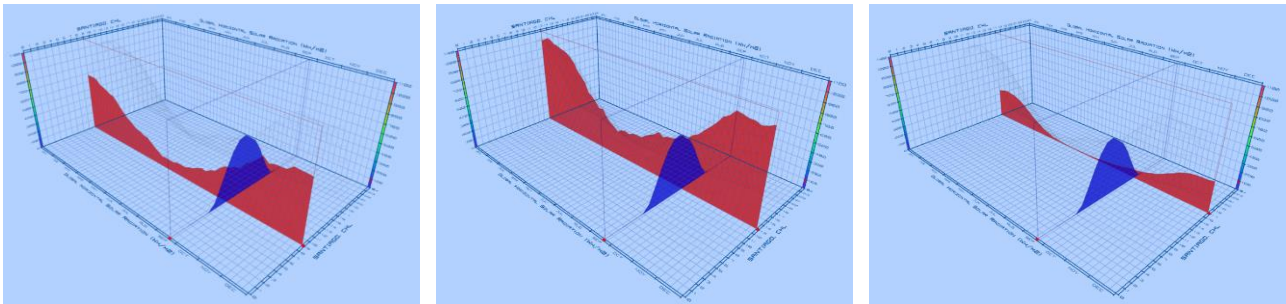


Figura 68. Secciones de gráfico de radiación solar, mañana, medio día y tarde en la ciudad de Santiago, Chile. 21 septiembre. Imagen de pantalla extraída de AndrewMarsh.

Concepción

Analizando los valores de los rangos de las cartografías de sombra, para la temporada de verano necesita 509 horas a lo largo del año, estando en un rango de confort, mostrando los valores máximos de temperatura y requerimiento de sombra entre octubre y diciembre.

Para invierno la necesidad de sombra requiere 117 horas, asignando en junio el periodo para evaluar si la inclinación solar logra incidir en la fachada, disminuyendo el porcentaje de sombra que se auto proyecta el muro.

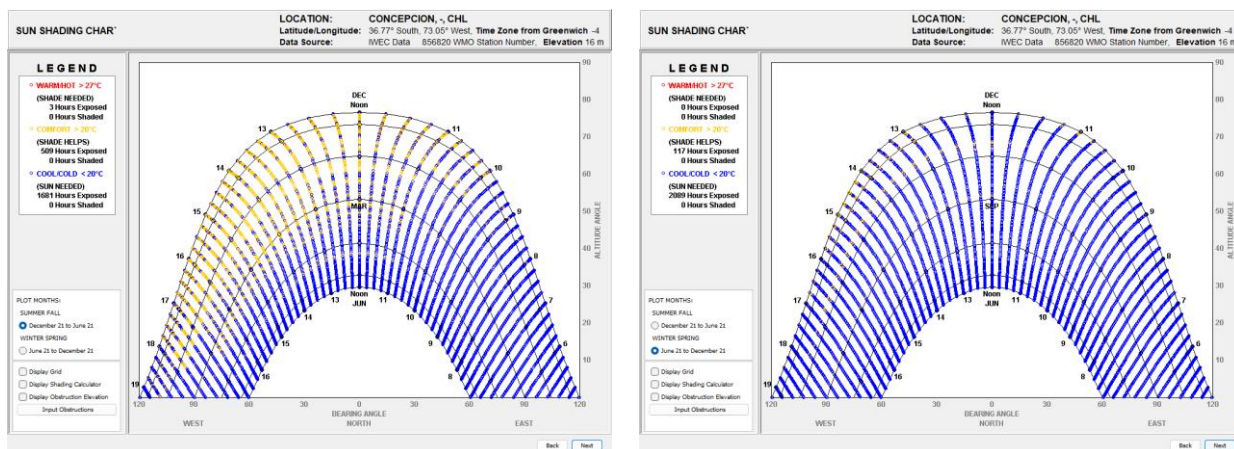


Figura 69. Imágenes de pantalla, asoleamiento en solsticios y equinoccios de la ciudad de Concepción, Chile. Periodos diciembre a junio y diciembre a junio. Generadas a partir del software Climate Consultant 6.

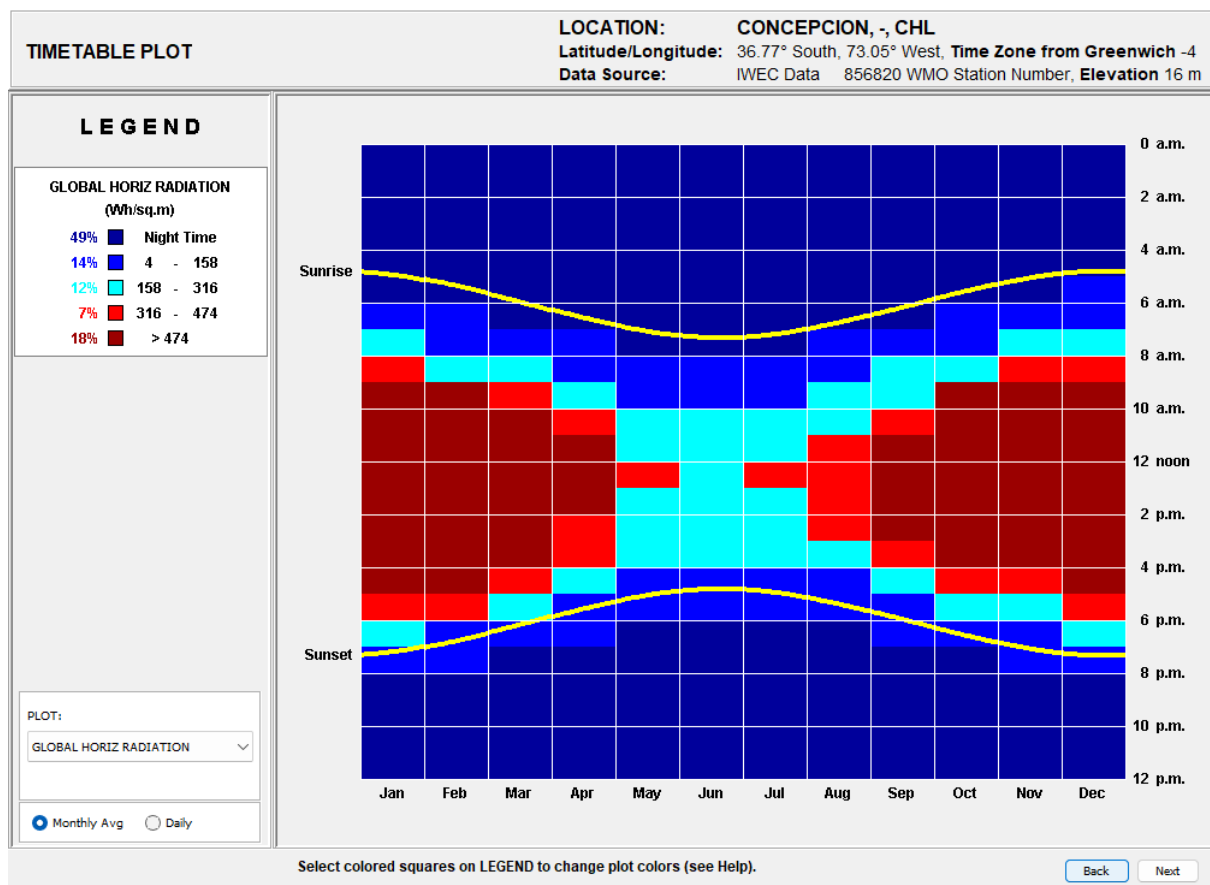


Figura 70. Gráfico de radiación global horizontal anual en la ciudad de Concepción, Chile. Generados a partir del software Climate Consultant 6.

Los rangos a evaluar quedan definidos para los solsticios de verano e invierno, y equinoccio de primavera, evaluando modelar al día con mayor y menor radiación global horizontal.

Invierno: 10am / 13pm / 16pm – Primavera: 9am / 13pm / 16pm – Verano: 8am / 12pm / 17pm

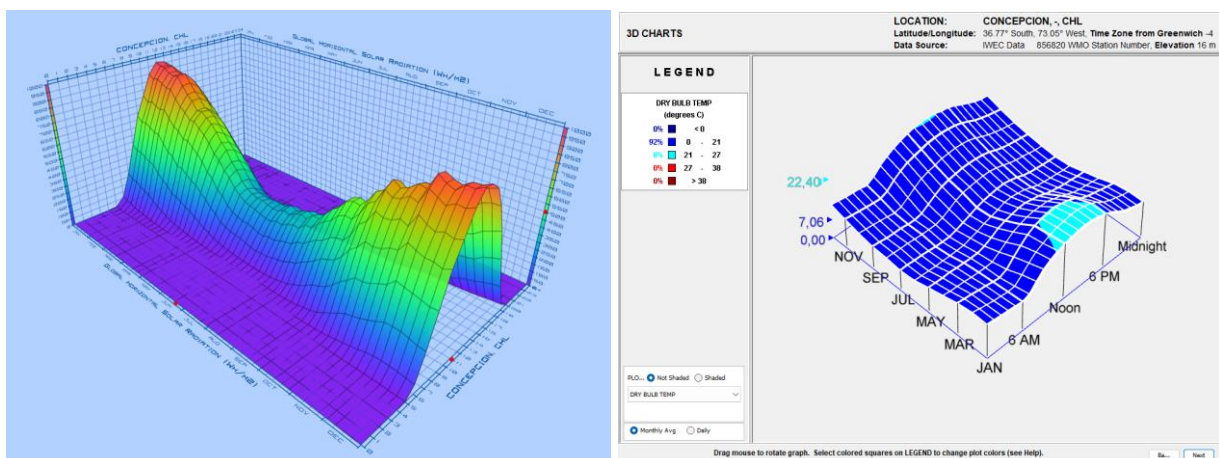


Figura 71. Imágenes de pantalla de gráficos 3D de radiación global horizontal de la ciudad de Concepción, Chile. Izquierda AndrewMarsh, derecha Climate Consultant 6.

El valor de radiación global horizontal máximo es de 960 Wh/m², dentro de un 18% de los valores más elevados (>474 Wh/m²). Los rangos de temperatura con mayor cantidad de veces en el año fluctúan entre 0-21°C con un 92%, con la variable de temperatura más alta 22,4°C con el 8% entre 21-27°C. de media mensual.

Se evaluarán los rangos de hora en los que la radiación solar es más elevada, para verano, 01 de enero, 8am para fachada oriente con 415 Wh/m², a las 12pm para fachada norte con un valor de 960 Wh/m², y a las 17pm para fachada poniente con 420 Wh/m².

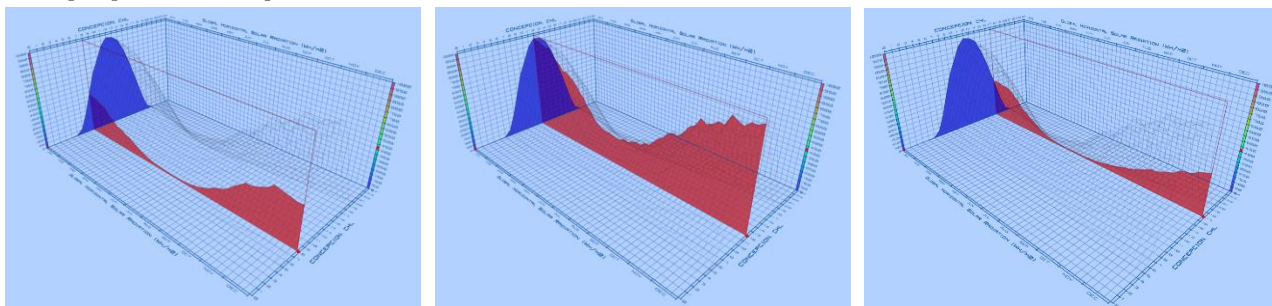


Figura 72. Secciones de gráfico de radiación solar, mañana, medio día y tarde en la ciudad de Concepción, Chile. 01 enero. Imagen de pantalla extraída de AndrewMarsh.

El análisis de radiación solar para solsticio de invierno el día 21 de junio, a las 10am para la fachada oriente con 160 Wh/m^2 . a las 13 de la tarde para fachada norte con 290 Wh/m^2 . y 16 horas para la fachada poniente con 75 Wh/m^2 .

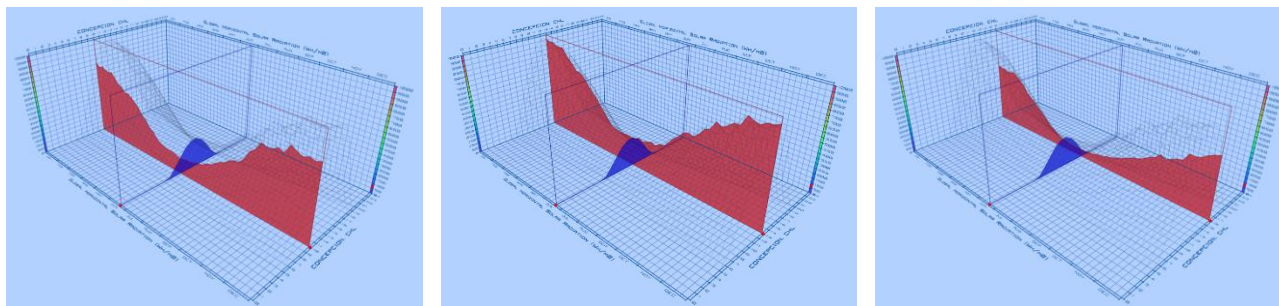


Figura 73. Secciones de gráfico de radiación solar, mañana, medio día y tarde en la ciudad de Concepción, Chile. 21 junio. Imagen de pantalla extraída de AndrewMarsh.

Para el equinoccio de primavera, 21 de septiembre, a las 9 am para fachada oriente con 310 Wh/m^2 , a las 13pm para fachada norte con 580 Wh/m^2 y a las 17pm para fachada poniente 110 Wh/m^2 .

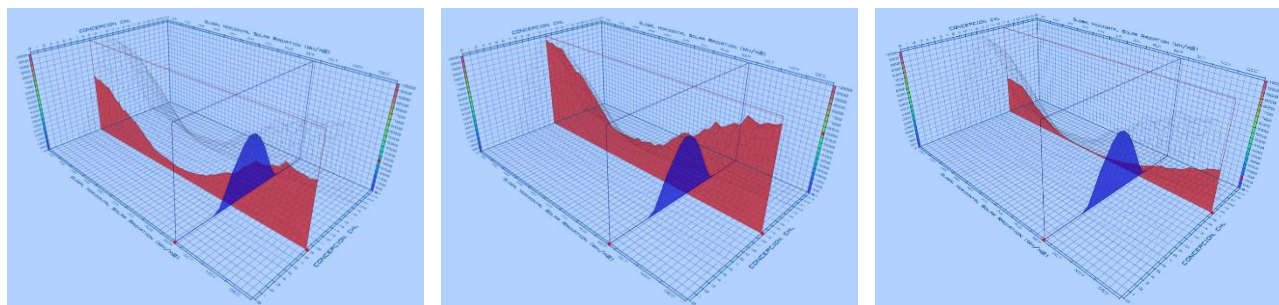


Figura 74. Secciones de gráfico de radiación solar, mañana, medio día y tarde en la ciudad de Concepción, Chile. 21 septiembre. Imagen de pantalla extraída de AndrewMarsh.

Esquema radiación global directa

Tabla 7. Radiación global directa por ciudad, fecha y orientación.

			ANTOFAGASTA			SANTIAGO			CONCEPCIÓN		
			INVIERNO 21 de JUNIO	PRIMAVERA 21 de SEPTIEMBRE	VERANO 29 de FEBRERO	INVIERNO 04 de JUNIO	PRIMAVERA 21 de SEPTIEMBRE	VERANO 21 de DICIEMBRE	INVIERNO 21 de JUNIO	PRIMAVERA 21 de SEPTIEMBRE	VERANO 01 de ENERO
ANTOFAGASTA	RAD. SOLAR PONIENTE		175 Wh/m ² 16 pm	130 Wh/m ² 17 pm	290 Wh/m ² 17 pm	-	-	-	-	-	-
	RAD. SOLAR NORTE		600 Wh/m ² 13 pm	850 Wh/m ² 13 pm	1022 Wh/m ² 12 pm	-	-	-	-	-	-
	RAD. SOLAR ORIENTE		270 Wh/m ² 9 am	280 Wh/m ² 8 am	330 Wh/m ² 8 am	-	-	-	-	-	-
SANTIAGO	RAD. SOLAR PONIENTE		-	-	-	70 Wh/m ² 16 pm	95 Wh/m ² 17 pm	340 Wh/m ² 17 pm	-	-	-
	RAD. SOLAR NORTE		-	-	-	280 Wh/m ² 13 pm	565 Wh/m ² 13 pm	1005 Wh/m ² 12 pm	-	-	-
	RAD. SOLAR ORIENTE		-	-	-	200 Wh/m ² 10 am	380 Wh/m ² 9 am	490 Wh/m ² 8 am	-	-	-
CONCEPCIÓN	RAD. SOLAR PONIENTE		-	-	-	-	-	-	75 Wh/m ² 16 pm	115 Wh/m ² 17 pm	420 Wh/m ² 17 pm
	RAD. SOLAR NORTE		-	-	-	-	-	-	288 Wh/m ² 13 pm	575 Wh/m ² 13 pm	960 Wh/m ² 12 pm
	RAD. SOLAR ORIENTE		-	-	-	-	-	-	160 Wh/m ² 10 am	320 Wh/m ² 9 am	415 Wh/m ² 8 am

Esquema de resumen información de radiación solar incidente de cada ciudad por orientación y fecha, estos datos son base para el cálculo de porcentaje de radiación solar y establecer la reducción del valor de radiación.

Recomendaciones de diseño

Las siguientes recomendaciones de diseño se plantean de los climas evaluados, como estrategias de diseño pasivos obtenidos del software “ClimateStudio” basado en el estándar “Ashrae55”, y se realiza la comparativa del como los modelos de muro responden a estas recomendaciones.

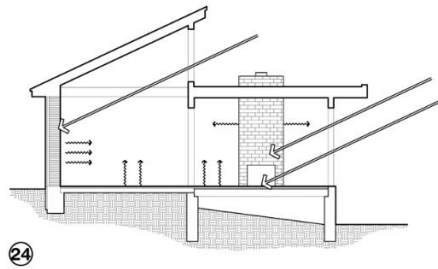
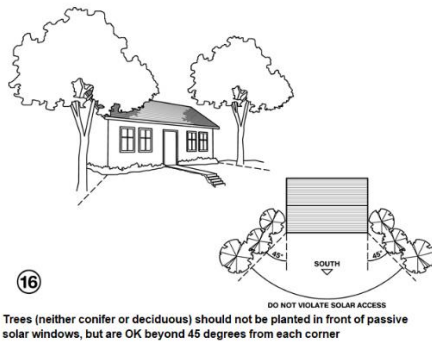
16- Se realiza mediante el auto sombreado de los elementos voladizos de la fachada, se realiza corrección de orientación.

24- La sucesión de capas va armando un sistema de elevada masa térmica. Según la estrategia de la imagen esta puede recibir la radiación en los muros internos para liberar la energía durante el día.

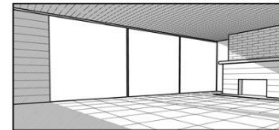
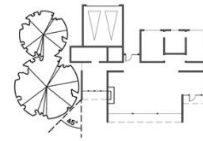
31- A escala de este diseño el muro permite recibir la radiación solar en invierno y bloquearla en verano, al igual que permite recibir mayor radiación entre ciertas horas, luego para las orientaciones este y oeste reducir la cantidad de radiación sobre la fachada.

40- La alta masa térmica del hormigón permite la liberación o absorción de energía calorífica en un periodo más prolongado, lo que permite sentir espacios interiores más frescos y la oscilación térmica más baja durante la noche, gracias a la ganancia de radiación que se libera durante la noche, manteniendo temperaturas más estables a lo largo del día.

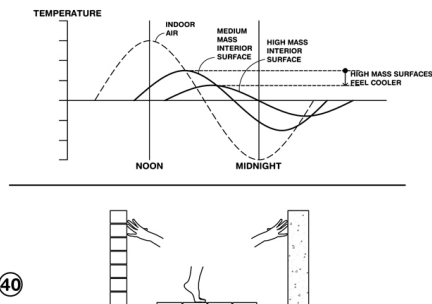
41- La incorporación de aislante en sus capas internas se vuelve lo suficientemente eficiente, sin la necesidad de colocar como elemento adicional después del fraguado del hormigón como lo sería el sistema tradicional.



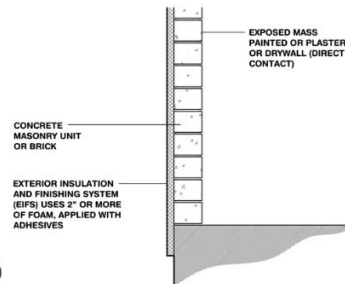
Use high mass interior surfaces like slab floors, high mass walls, and a stone fireplace to store winter passive heat and summer night 'coolth'



Organize floorplan so winter sun penetrates into daytime use spaces with specific functions that coincide with solar orientation



High mass interior surfaces (tile, slate, stone, brick or adobe) feel naturally cool on hot days and can reduce day-to-night temperature swings



The best high mass walls use exterior insulation (like EIFS foam) and expose the mass on the interior or add plaster or direct contact drywall

Figura 75. Imágenes sobre estrategias de diseño pasivo. Fuente: Climate Consultant 6.0.

3.3. Auto Sombreado en Muros

En función de los datos calculados de transmitancia térmica y la selección de la ubicación óptima para cada modelo, se evaluará la capacidad de auto sombreado de los muros a raíz de las siguientes condiciones: orientación, fecha y hora determinadas en el subcapítulo información de ciudades.

Los pasos para el procesado de imágenes se formulan de la siguiente manera, desde “Rhinceros” se programa la ubicación del modelo de muro, orientación, fecha y hora. Luego en vista frontal se realiza el renderizado del resultado de sombra arrojada en esa instancia, obteniendo una imagen en formato “png”.

Para cuantificar el porcentaje de sombra sobre la fachada del muro se utiliza un parámetro desarrollado en “Grasshopper” el cuál descompone una imagen frontal con las condicionantes de diseño aplicados a cada modelo de muro. Este parámetro deconstruye la imagen de superficie en pixeles con los valores “RGB”, los que son codificados para cuantificar la cantidad de pixeles oscuros y obtener el porcentaje de estos con relación a su total.

La evaluación predominante es sobre el resultado de la orientación norte, con los tres horarios definidos se define un promedio del ahorro de radiación solar incidente, y para las orientaciones oriente y poniente se establece un resultado por estación (verano, invierno y primavera), el cual se promedia para entregar un valor promedio anual del porcentaje de auto sombreado.

El siguiente diagrama representa las orientaciones a evaluar, las posiciones solares por las horas determinadas y la cantidad de radiación solar incidente sobre la fachada.

La orientación norte evalúa tres horas, mañana, tarde, tarde – noche. Orientación oriente, hora de mañana. Orientación poniente, tarde – noche.

Estos cinco análisis se realizan por estación, procesando en total 15 proyecciones solares por zona térmica, para establecer el promedio mensual y anual de la disminución de radiación. El rango de evaluación queda determinado entre las orientaciones este a oeste para la fachada norte, este y oeste.

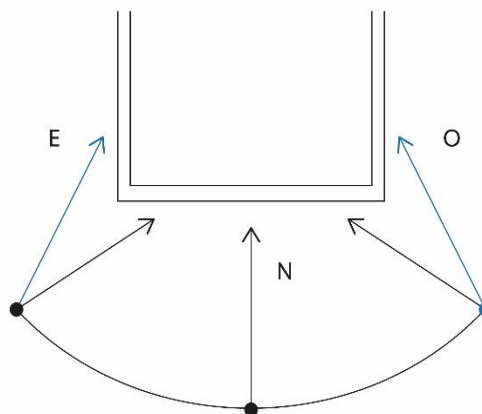


Figura 76. Diagrama de orientaciones para la evaluación de sombras.

Nota: Durante la realización del procedimiento de cálculo se detectan algunas diferencias con los datos recopilados de la información climática, principalmente los rangos de hora utilizados, los cuales son corregidos y presentados en la tabla de valores de radiación de cada ciudad, siendo indicados en la introducción de cada una las modificaciones realizadas si fuese el caso.

El motivo del cambio de hora para ciertas zonas térmicas es la detección de horarios que quedan fuera del rango de análisis, para la evaluación de la fachada en la orientación norte.

Los modelos presentados a continuación son los modelos representativos en sus valores de transmitancia térmica por ciudad, para evaluar como las diferencias de este desempeño se reflejan en la capacidad de auto sombreado. En los archivos anexos se adjunta el procedimiento de desarrollo y procesado de cada muro.

Zona Térmica A - Antofagasta

Para la zona térmica A, correspondiente a la ciudad de Antofagasta, son analizados los modelos **MA_D12 (U: 1.1 W/m²K)** y **MB_D17 (U: 3.11W/m²K)**, se adjunta la tabla de valores de radiación y temperatura.

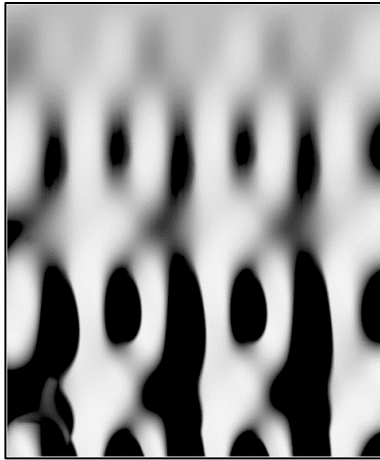
Corrección en fecha 28 de febrero, horario 8am a 9am.

Tabla 8. Información climática ciudad de Antofagasta, Chile.

LATITUD -23.43° LONGITUD -70.43°		ANTOFAGASTA		
		INVIERNO 21 de JUNIO	PRIMAVERA 21 de SEPTIEMBRE	VERANO 28 de FEBRERO
ANTOFAGASTA	RAD SOLAR PONIENTE	175 Wh/m² 15.3°c 16 pm	130 Wh/m² 15.6°c 17 pm	290 Wh/m² 21.5°c 17 pm
	RAD SOLAR NORTE	600 Wh/m² 16.6°c 13 pm	850 Wh/m² 17.3°c 13 pm	1022 Wh/m² 23°c 12 pm
	RAD SOLAR ORIENTE	270 Wh/m² 15°c 9 am	280 Wh/m² 15.2°c 8 am	590 Wh/m² 21.7°c 9 am

Cálculo de modelo MA_D12 / 21 de junio

Orientación Norte / Horarios 9am - 13pm - 16pm



Proyección de sombra: 19.13%

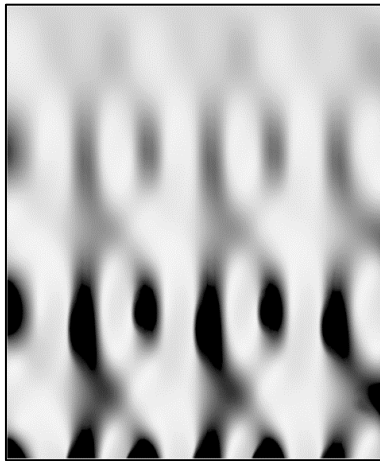


Proyección de sombra: 0.45%



Proyección de sombra 15.06 %

Orientación Oriente – Poniente / Horarios 9am - 16pm



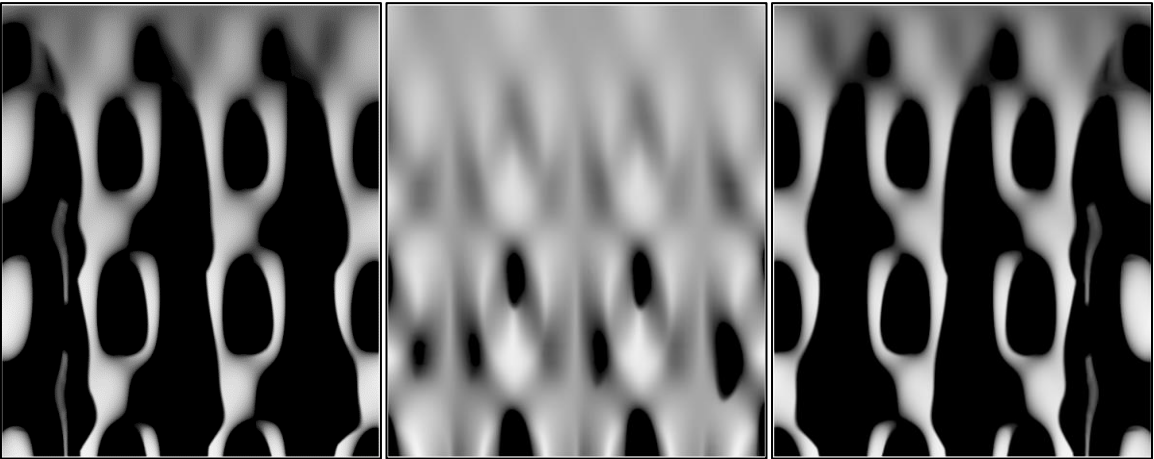
Proyección de sombra: 5.32 %



Proyección de sombra: 8.22%

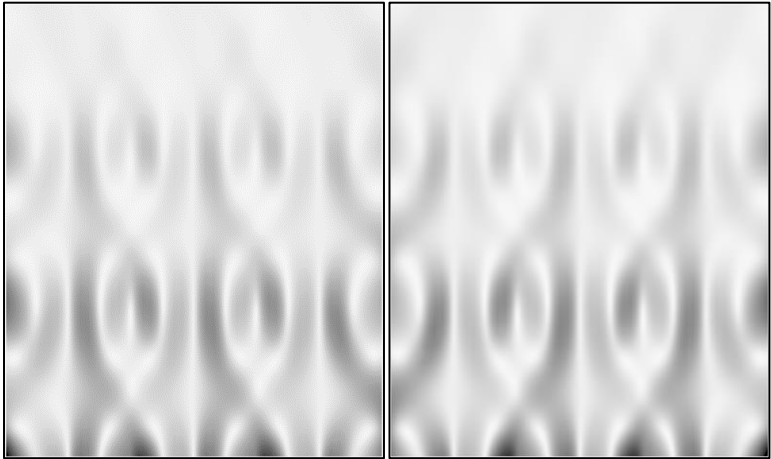
Cálculo de modelo MA_D12 / 21 de septiembre

Orientación Norte / Horarios 8am - 13pm - 17pm



Proyección de sombra: 53.14% Proyección de sombra: 4% Proyección sombra: 51.16%

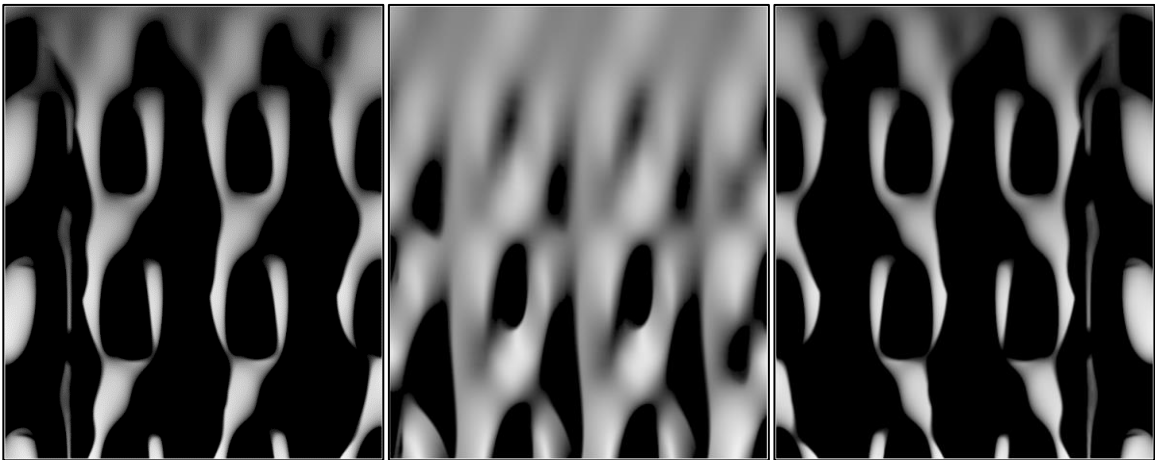
Orientación Oriente-Poniente / Horarios 8am - 17pm



Proyección de sombra: 0% Proyección de sombra: 0%

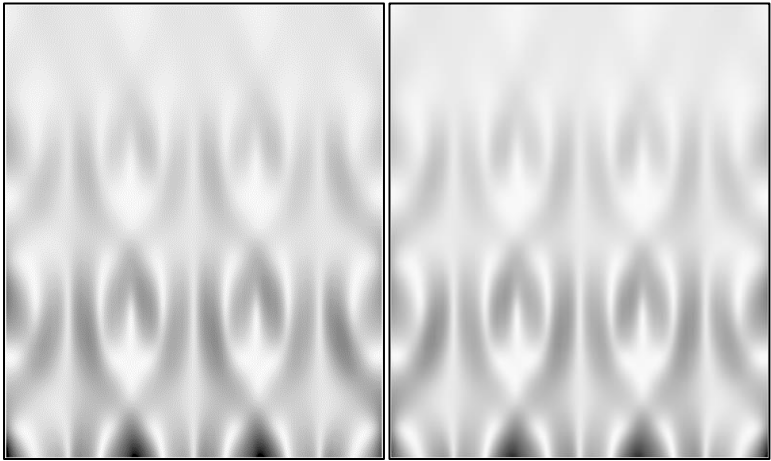
Cálculo de modelo MA_D12 / 28 de febrero

Orientación Norte / Horarios 9am - 12pm - 17pm



Proyección de sombra: 59.04% Proyección de sombra: 14.67% Proyección de sombra: 62.26%

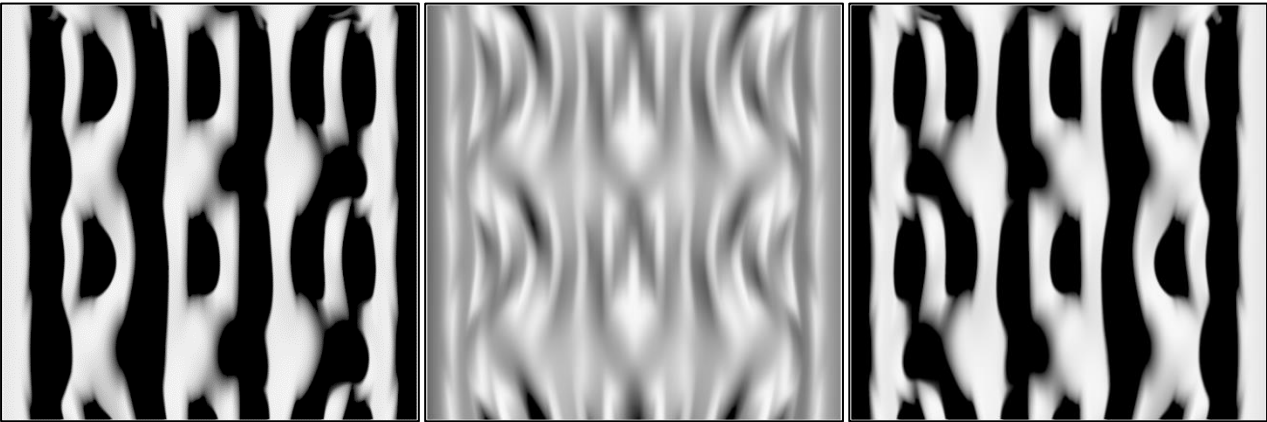
Orientación Oriente -Poniente / Horarios 9am – 17pm



Proyección de sombra: 0.03% Proyección de sombra: 0%

Cálculo de modelo MB_D17 / 21 de junio

Orientación Norte / Horarios 9am - 13pm - 16pm

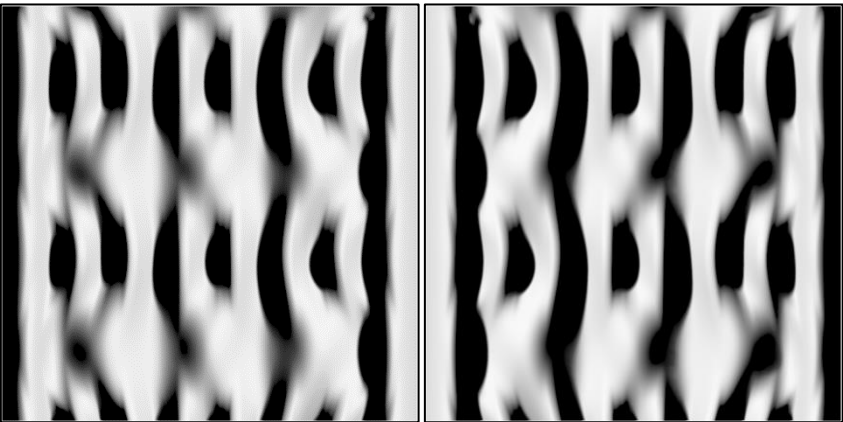


Proyección de sombra: 45%

Proyección de sombra: 0.29%

Proyección de sombra: 40.32%

Orientación Oriente - Poniente / Horarios 9am - 16pm

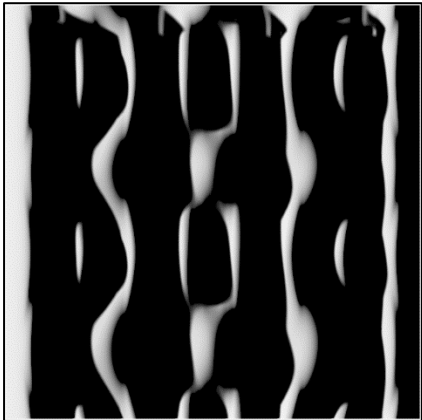


Proyección de sombra: 22.87 %

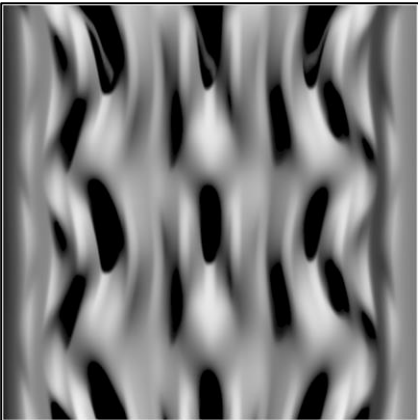
Proyección de sombra: 29.36%

Cálculo de modelo MB_D17 / 21 de septiembre

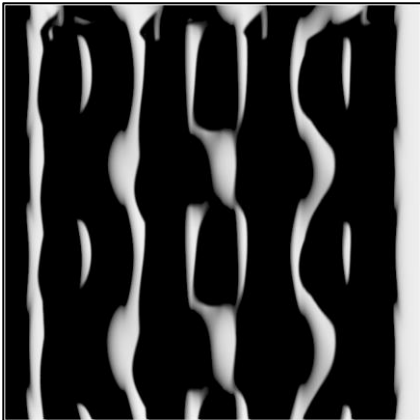
Orientación Norte / Horario: 8am - 13pm - 17pm



Proyección de sombra: 72.94%

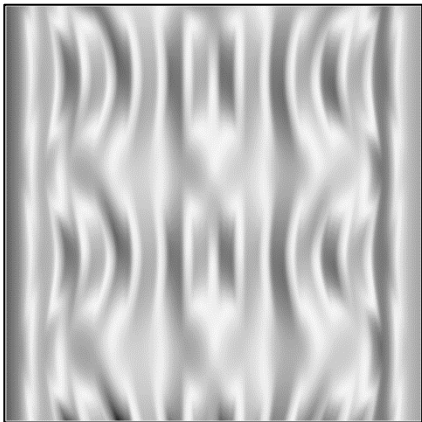


Proyección de sombra: 10.75%

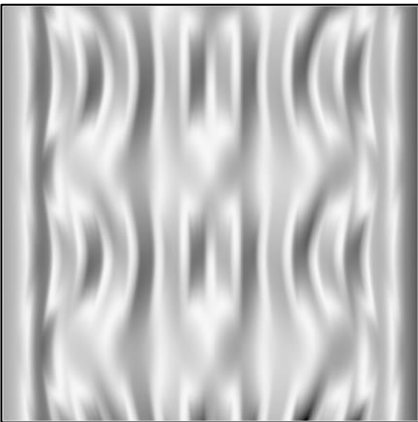


Proyección sombra: 71.9%

Orientación Oriente - Poniente / Horarios 8am - 17pm



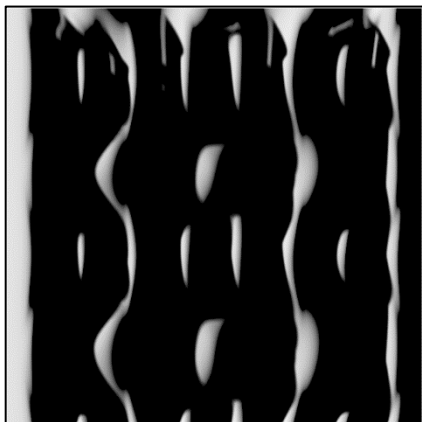
Proyección de sombra: 0 %



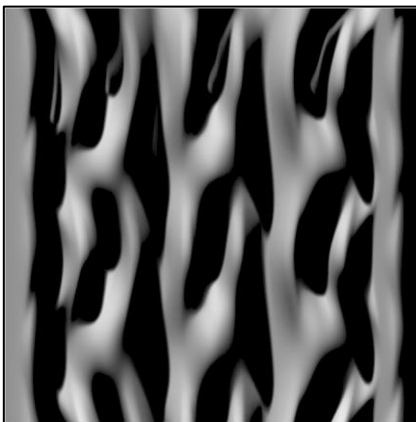
Proyección de sombra: 0%

Cálculo de modelo MB_D17 / 28 de febrero

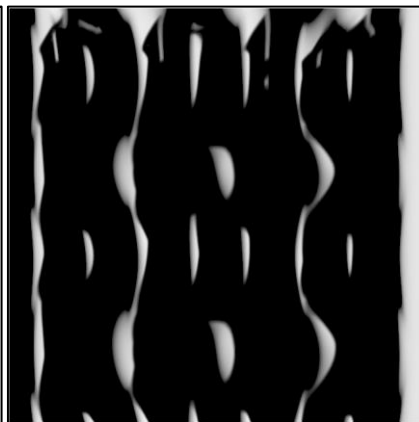
Orientación Norte / Horarios 9am - 12pm - 17pm



Proyección de sombra: 77.66%

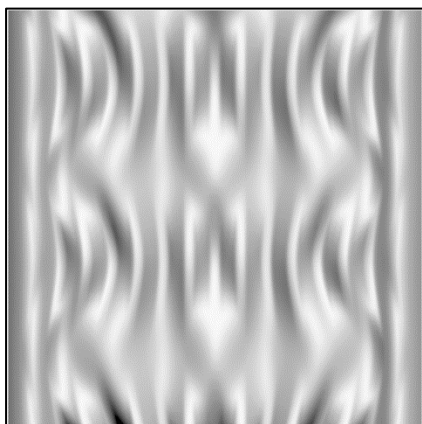


Proyección de sombra: 40.5%

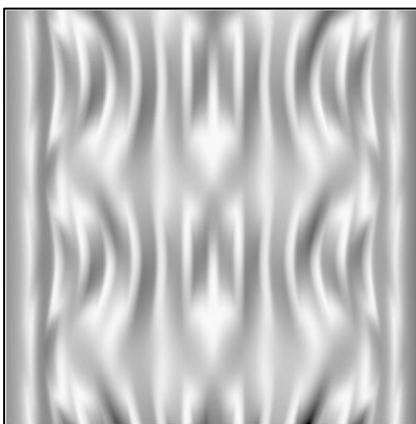


Proyección de sombra: 79.21%

Orientación Oriente-Poniente / Horarios 9am - 17pm



Proyección de sombra: 0.02%



Proyección de sombra: 0%

Tabla 9. Resultados del desempeño térmico de prototipos en ciudad de Antofagasta.

Porcentaje de sombra sobre fachada				Radiación global horizontal (Wh/m²)				Auto sombreado (%)					Porcentaje autosombrado fachada norte	Ahorro de radiación sobre fachada (Wh/m²)				
				Promedio temperatura	Fachada Norte			Fachada Norte			Fachada oriente	Fachada poniente		Fachada Norte			Promedio diario	
Modelo de muro	zona térmica	Fecha	Transmitancia térmica		Oriente	Norte	Poniente	Oriente	Norte	Poniente				Oriente	Norte	Poniente		
	MA_D12	A	28-feb	1,10	22,1	590	1022	290	59,04	14,67	62,26	0,03	0,00	45,32	348,3	149,9	180,6	226,3
			21-sept		16,0	280	850	130	53,14	4,00	51,16	0,00	0,00	36,10	148,8	34,0	66,5	83,1
			21-jun		15,6	270	600	175	19,13	0,45	15,06	5,32	8,22	11,55	51,7	2,7	26,4	26,9
	MB_D12	A	28-feb	1,16	22,1	590	1022	290	60,08	26,53	63,21	0,36	0,17	49,94	354,5	271,1	183,3	269,6
			21-sept		16,0	280	850	130	50,82	14,66	49,06	0,00	0,00	38,18	142,3	124,6	63,8	110,2
			21-jun		15,6	270	600	175	13,81	1,61	11,35	3,56	5,86	8,92	37,3	9,7	19,9	22,3
	MB_D17	A	28-feb	3,11	22,1	590	1022	290	77,66	40,50	79,21	0,02	0,00	65,79	458,2	413,9	229,7	367,3
			21-sept		16,0	280	850	130	72,94	10,75	71,90	0,00	0,00	51,86	204,2	91,4	93,5	129,7
			21-jun		15,6	270	600	175	45,00	0,29	40,32	22,87	29,36	28,54	121,5	1,7	70,6	64,6

La tabla 9 muestra los resultados de todo el proceso investigativo, se indican los valores de todos los modelos de la zona térmica.

Para empezar la comparativa, el modelo MA_D12 logra una transmitancia térmica de 1.10 W/m²K. gracias a sus curvas de 4 “montes” intercalados con 6 “montes más estrechos, logra auto sombrarse en 45.32% para verano reduciendo un 226.3 de 634. 36.10% en primavera reduciendo un 83.1 de 420. 11.55% en invierno reduciendo 26.4 de 348. Llegando a reducir un promedio de 112 (Wh/m²) de ahorro anual, arrojando un total de radiación de 355 (Wh/m²) sobre la fachada norte.

El modelo MB_D17 con una transmitancia térmica de 3.11 W/m²K. Es un prototipo propuesto en su diseño como antepecho a partir del modelo MA_D12, agregando a su estructura un panel adicional, logrando auto sombrarse en 65.79% para verano reduciendo un 367.3 de 634. 51.86% en primavera reduciendo un 129.7 de 420. 28.54% en invierno reduciendo 64.6 de 348. Llegando a reducir un promedio de 187 (Wh/m²) de ahorro anual, arrojando un total de radiación de 280 (Wh/m²) sobre la fachada norte.

Zona Térmica D – Santiago

Para la zona térmica D, correspondiente a la ciudad de Santiago, son analizados los modelos **MD_D13 (U: 1.07 W/m²K)** y **MA_D14 (U: 0.66W/m²K)**, se adjunta la tabla de valores de radiación y temperatura.

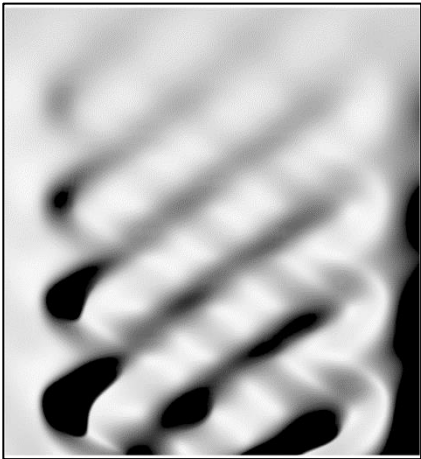
Corrección en fecha 21 de diciembre, horario 8am a 10am y 17pm a 15:30pm.

Tabla 10. Información climática ciudad de Santiago, Chile.

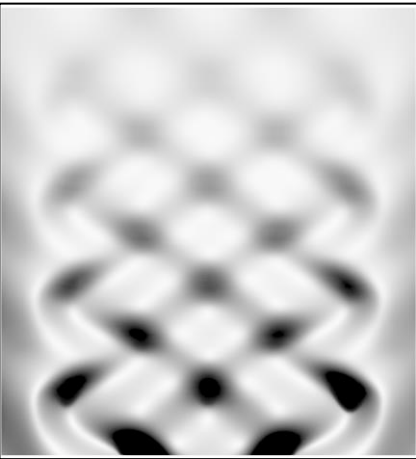
LATITUD -33.38° LONGITUD -70.78°		SANTIAGO		
		INVIERNO 04 de JUNIO	PRIMAVERA 21 de SEPTIEMBRE	VERANO 21 de DICIEMBRE
SANTIAGO	RAD SOLAR PONIENTE	70 Wh/m² 14°C 16 pm	95 Wh/m² 15.5°C 17 pm	640 Wh/m² 27.3°C 15:30 pm
	RAD SOLAR NORTE	280 Wh/m² 14°C 13 pm	565 Wh/m² 17.4°C 13 pm	965 Wh/m² 27.4°C 12:40 pm
	RAD SOLAR ORIENTE	200 Wh/m² 10°C 10 am	380 Wh/m² 12.2°C 9 am	830 Wh/m² 23.6°C 10:00 am

Cálculo de modelo MD_D13 / 04 de junio

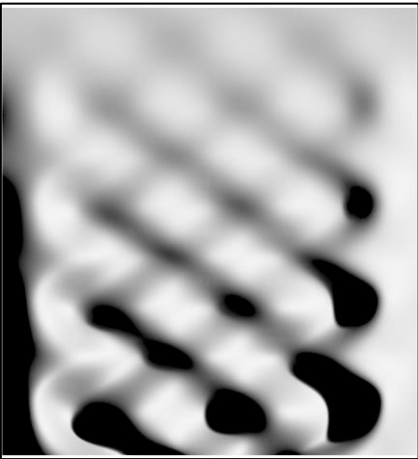
Orientación Norte / Horarios 10am - 13pm - 16pm



Proyección de sombra: 7.53%

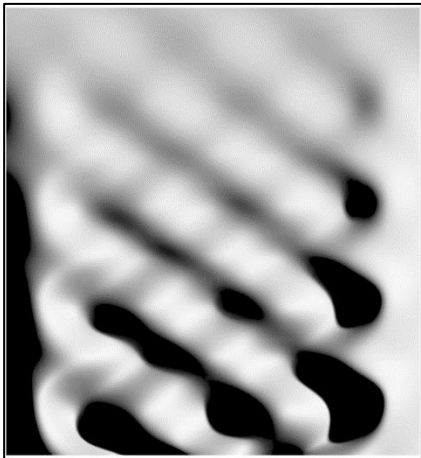


Proyección de sombra: 1.93%

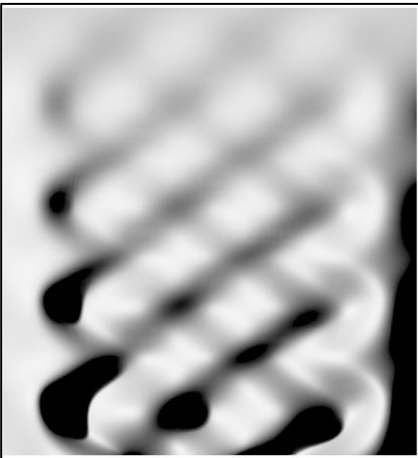


Proyección de sombra: 10.97%

Orientación Oriente - Poniente / Horarios 10am - 16pm



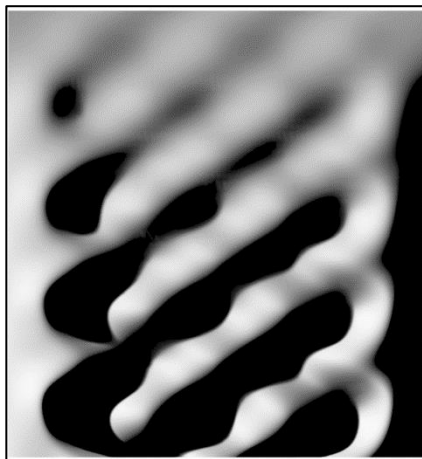
Proyección de sombra: 13.22%



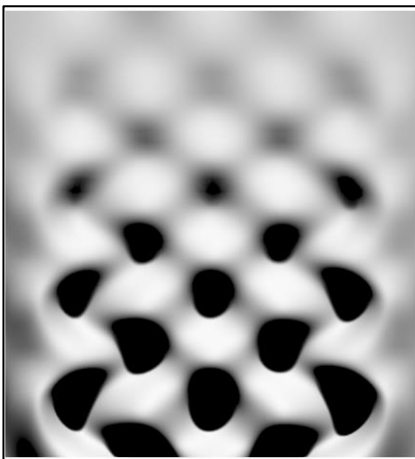
Proyección de sombra: 7.98%

Cálculo de modelo MD_D13 / 21 de septiembre

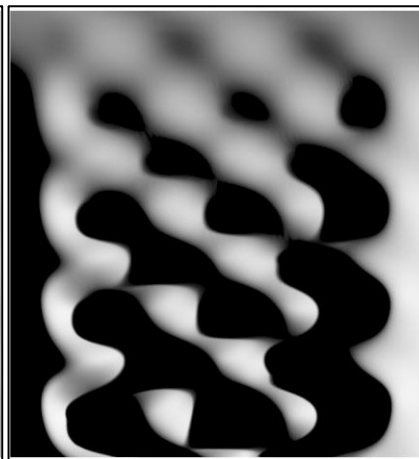
Orientación Norte / Horarios 9am - 13pm - 17pm



Proyección de sombra: 29.83%

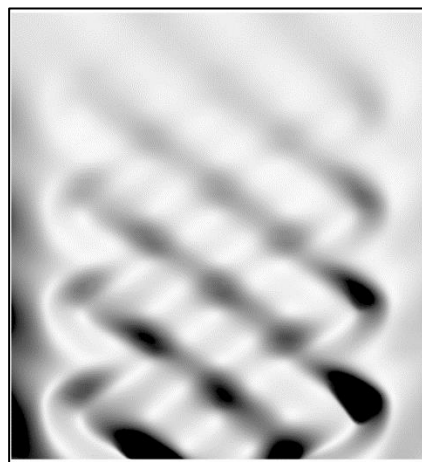


Proyección de sombra: 12.03%

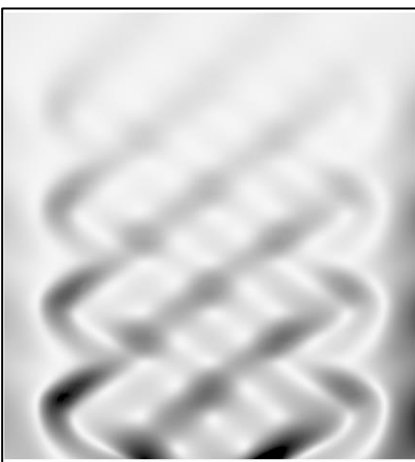


Proyección de sombra: 39.39%

Orientación Oriente – Poniente / Horarios 9am – 17pm



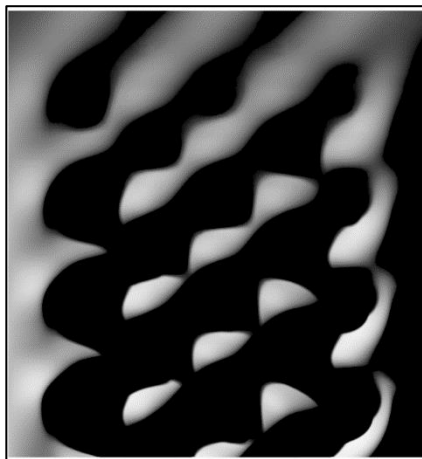
Proyección de sombra: 2.59%



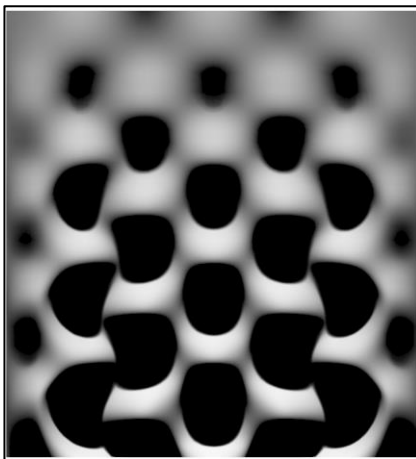
Proyección de sombra: 0.15% sombra

Cálculo de modelo MD_D13 / 21 de diciembre

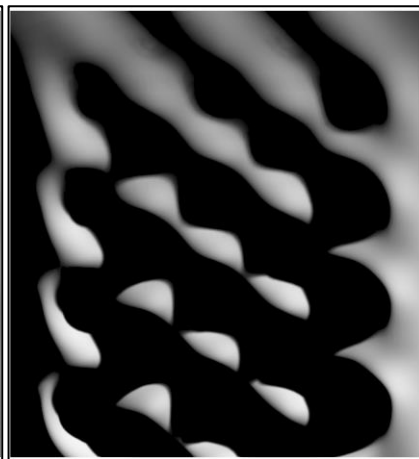
Orientación Norte / Horarios 10am -12:40pm - 15:30pm



Proyección de sombra: 54.44%

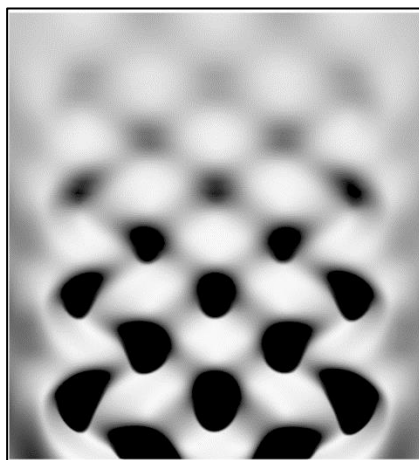


Proyección de sombra: 32.73%

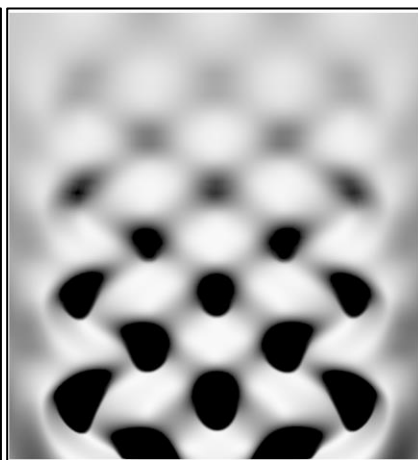


Proyección de sombra: 56.4%

Orientación Oriente - Poniente / Horarios 10am - 15:30pm



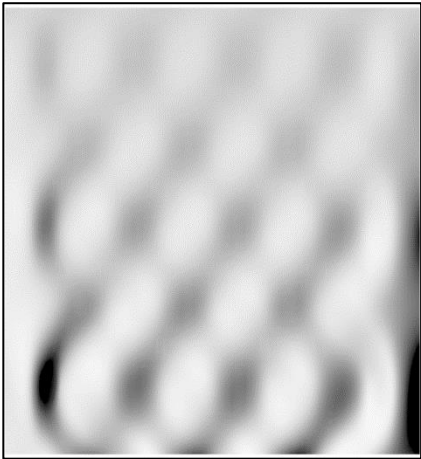
Proyección de sombra: 10.44%



Proyección de sombra: 9.58%

Cálculo de modelo MA_D14 / 04 de junio

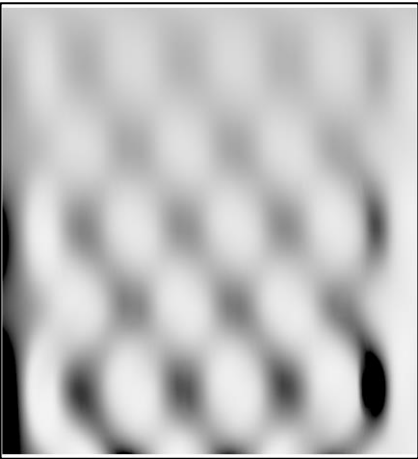
Orientación Norte / Horarios 10am - 13pm - 16pm



Proyección de sombra: 0.79%

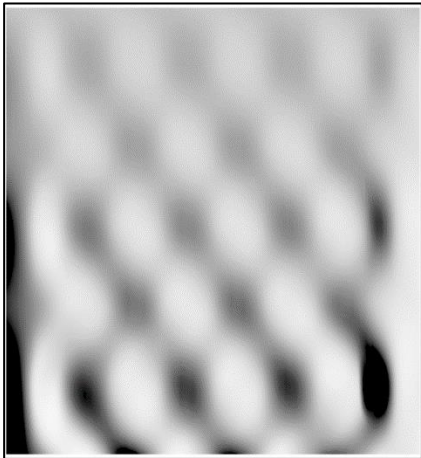


Proyección de sombra: 0%

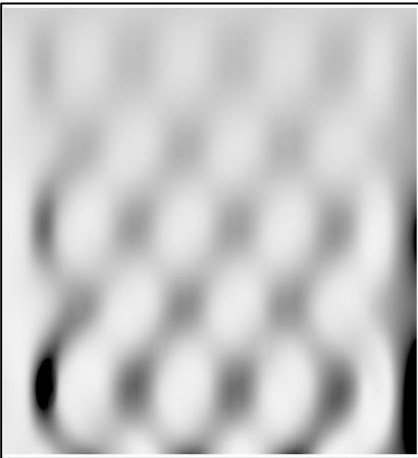


Proyección de sombra: 1.7%

Orientación Oriente - Poniente / Horarios 10am - 16pm



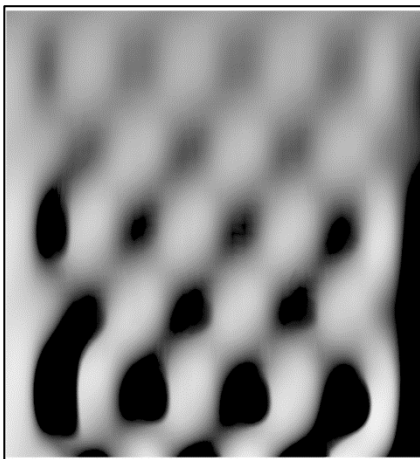
Proyección de sombra: 2.14%



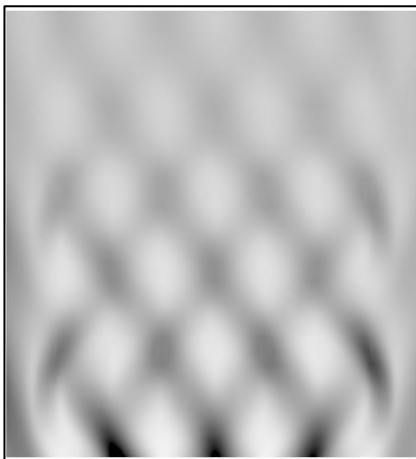
Proyección de sombra: 1.04%

Cálculo de modelo MA_D14 / 21 de septiembre

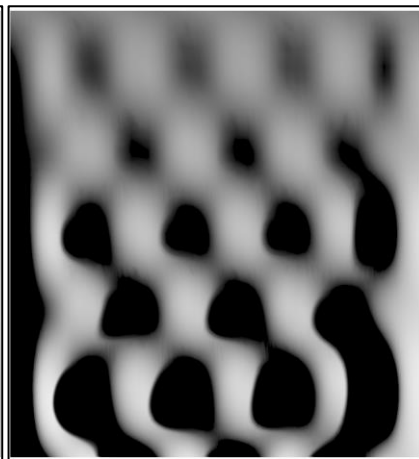
Orientación Norte / Horarios 9am - 13pm - 17pm



Proyección de sombra: 12.84 %



Proyección de sombra: 0.11 %



Proyección de sombra: 24.10 %

Orientación Oriente - Poniente / Horarios 9am - 17pm



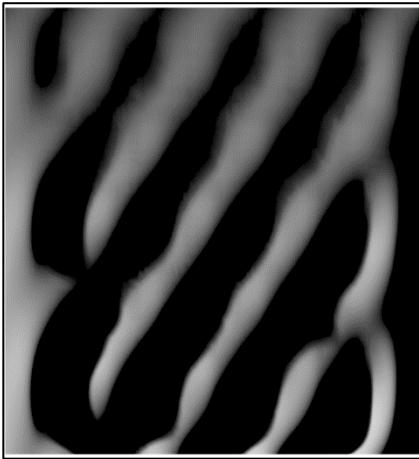
Proyección de sombra: 0%



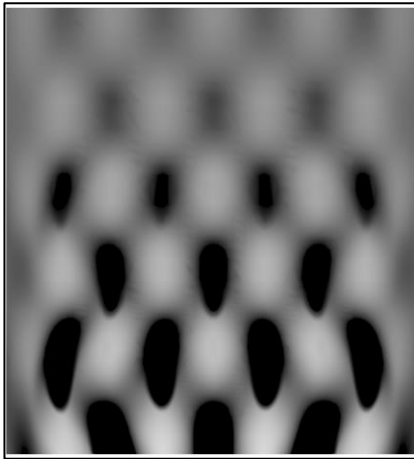
Proyección de sombra: 0% sombra

Cálculo de modelo MA_D14 / 21 de diciembre

Orientación Norte / Horarios 10am - 12:40pm - 15:30pm



Proyección de sombra: 46.11%

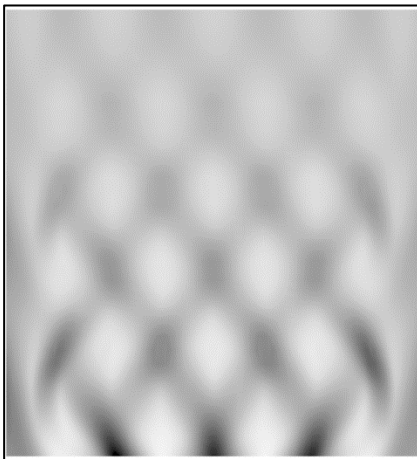


Proyección de sombra: 11.16%

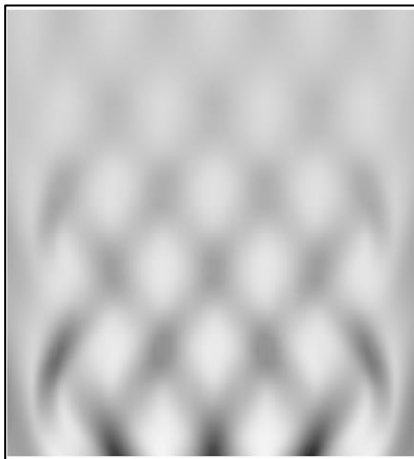


Proyección de sombra: 50.37%

Orientación Oriente-Poniente / Horarios 10am - 15:30pm



Proyección de sombra: 0.01%



Proyección de sombra: 0%

Tabla 11. Resultados del desempeño térmico de prototipos en ciudad de Santiago.

Porcentaje de sombra sobre fachada				Radiación global horizontal (Wh/m²)				Auto sombreado (%)					Porcentaje autosombrado fachada norte	Ahorro de radiación sobre fachada (Wh/m²)				
				Promedio temperatura	Fachada Norte			Fachada Norte			Fachada oriente	Fachada poniente		Fachada Norte			Promedio diario	
Modelo de muro	zona térmica	Fecha	Transmitancia térmica		Oriente	Norte	Poniente	Oriente	Norte	Poniente			Oriente	Norte	Poniente			
	MD_D13	D	21-dic	1,07	26,1	830	965	640	54,44	32,73	56,40	10,44	9,58	47,86	451,9	315,8	361,0	376,2
			21-sept		15,0	380	565	95	29,83	12,03	39,39	2,59	0,15	27,08	113,4	68,0	37,4	72,9
			04-jun		12,7	200	280	70	7,53	1,93	10,97	13,22	7,98	6,81	15,1	5,4	7,7	9,4
	ME_D13	D	21-dic	0,88	26,1	830	965	640	57,36	38,53	59,39	12,63	11,62	51,76	476,1	371,8	380,1	409,3
			21-sept		15,0	380	565	95	26,16	14,34	32,99	1,33	0,11	24,50	99,4	81,0	31,3	70,6
			04-jun		12,7	200	280	70	3,19	1,88	5,31	8,19	3,05	3,46	6,4	5,3	3,7	5,1
	MA_D14	D	21-dic	0,66*	26,1	830	965	640	46,11	11,16	50,37	0,01	0,00	35,88	382,7	107,7	322,4	270,9
			21-sept		15,0	380	565	95	12,84	0,11	24,10	0,00	0,00	12,35	48,8	0,6	22,9	24,1
			04-jun		12,7	200	280	70	0,79	0,00	1,70	2,14	1,04	0,83	1,6	0,0	1,2	0,9

El modelo MD_D13 con una transmitancia térmica de 1.07 W/m²K. Logra auto sombrarse en 47.86% para verano reduciendo un 376.2 de 812. 27.08% en primavera reduciendo un 72.9 de 347. 6.81% en invierno reduciendo 9.4 de 183. Llegando a reducir un promedio de 153 (Wh/m²) de ahorro anual, arrojando un total de radiación de 294 (Wh/m²) sobre la fachada norte.

El modelo MA_D14 con una transmitancia térmica de 0.66W/m²K., Logra auto sombrarse en 35.88% para verano reduciendo un 270.9 de 812. 12.35% en primavera reduciendo un 72.9 de 347. 0.9% en invierno reduciendo 0.9 de 183. Llegando a reducir un promedio de 99 (Wh/m²) de ahorro anual, arrojando un total de radiación de 349 (Wh/m²) sobre la fachada norte.

Zona Térmica E – Concepción

Para la zona térmica E, correspondiente a la ciudad de Concepción, son analizados los modelos **MB_D14 (U: 0.29 W/m²K)** y **MA_D16 (U: 1.05W/m²K)**, se adjunta la tabla de valores de radiación y temperatura.

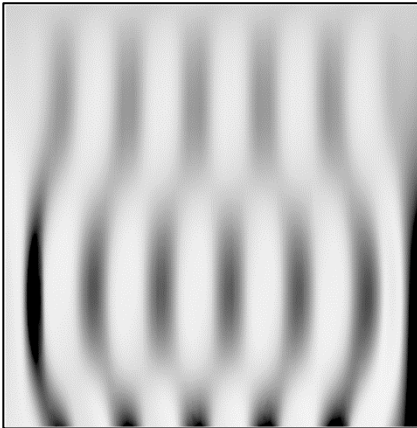
Corrección en fecha 1 de enero, de 8am a 10am y 17pm a 16pm.

Tabla 12. Información climática ciudad de Concepción, Chile.

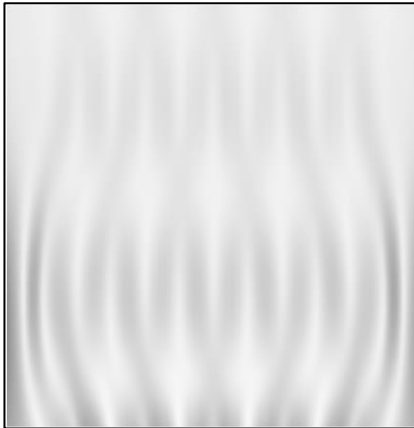
LATITUD -36.77° LONGITUD -73.05°		CONCEPCIÓN		
		INVIERNO 21 de JUNIO	PRIMAVERA 21 de SEPTIEMBRE	VERANO 01 de ENERO
CONCEPCIÓN	RAD SOLAR PONIENTE	75 Wh/m² 12.1°c 16 pm	115 Wh/m² 13.3°c 17 pm	615 Wh/m² 21°c 16 pm
	RAD SOLAR NORTE	288 Wh/m² 12.9°c 13 pm	575 Wh/m² 14.4°c 13 pm	960 Wh/m² 21.2°c 12 pm
	RAD SOLAR ORIENTE	160 Wh/m² 10.4°c 10 am	320 Wh/m² 11.7°c 9 am	760 Wh/m² 19.8°c 10 am

Cálculo de modelo MB_D14 / 21 de junio

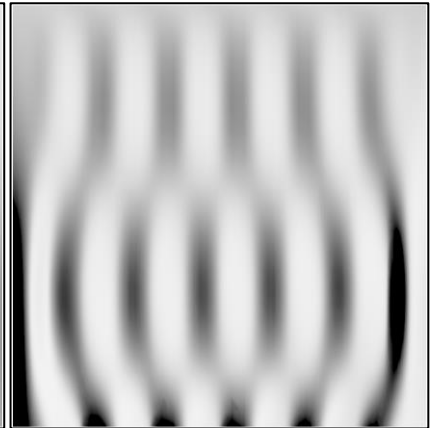
Orientación Norte / Horarios 10am - 13pm - 16pm



Proyección de sombra: 2.01%

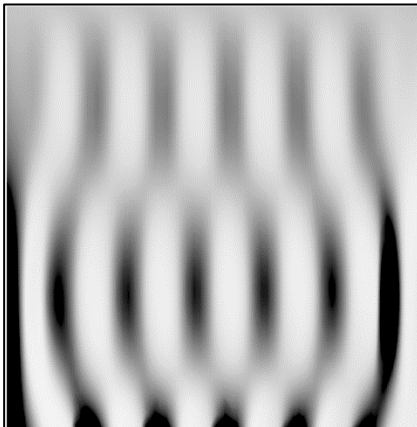


Proyección de sombra: 2.01%

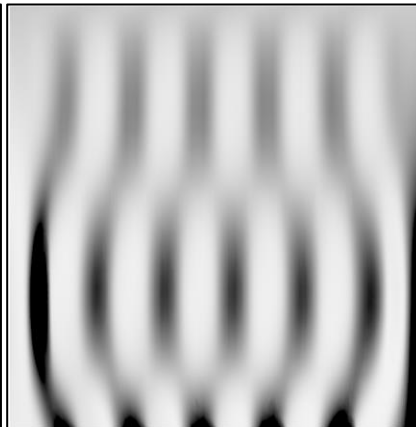


Proyección de sombra: 2.50%

Orientación Oriente - Poniente / Horarios 10am - 16pm



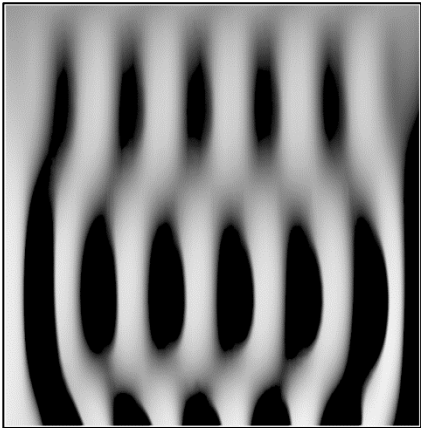
Proyección de sombra: 3.97%



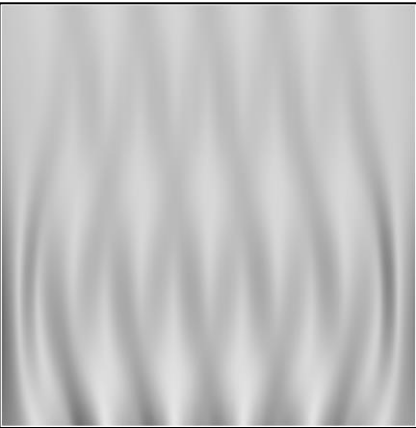
Proyección de sombra: 3.09%

Cálculo de modelo MB_D14 / 21 de septiembre

Orientación Norte / Horarios 9am - 13pm - 17pm



Proyección de sombra: 22.85%

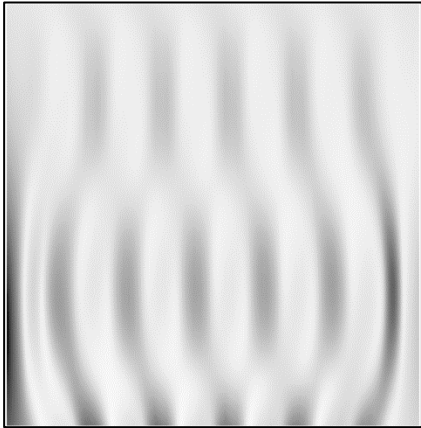


Proyección de sombra: 0 %



Proyección de sombra: 32.67%

Orientación Oriente - Poniente / Horarios 9am - 17pm



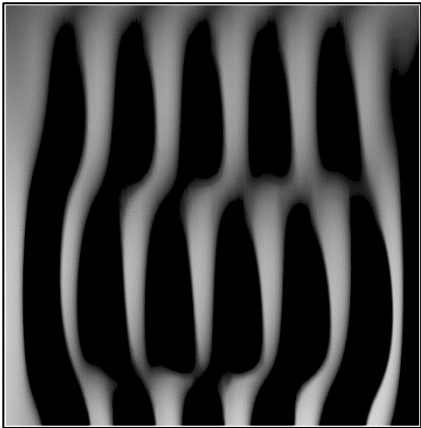
Proyección de sombra: 0.04%



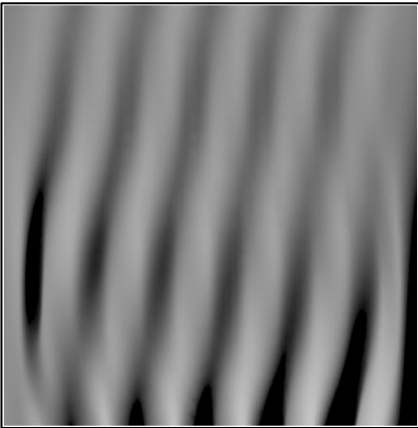
Proyección de sombra: 0%

Cálculo de modelo MB_D14 / 01 de enero

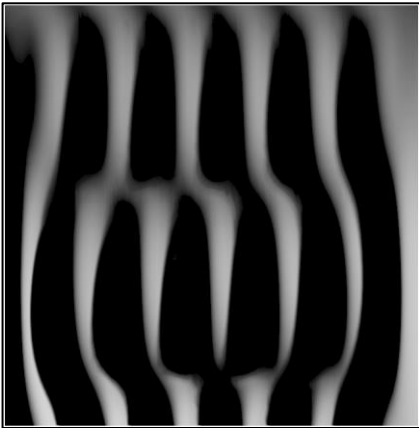
Orientación Norte / Horarios 10am - 12pm - 16pm



Proyección de sombra: 49.26%

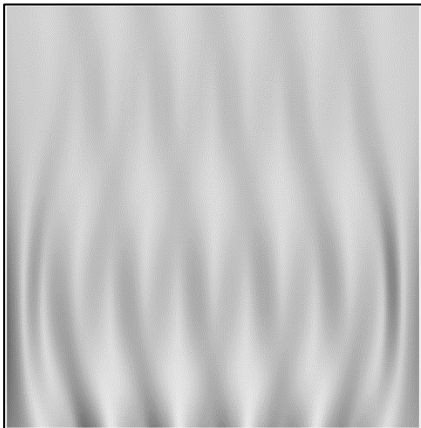


Proyección de sombra: 4.34%

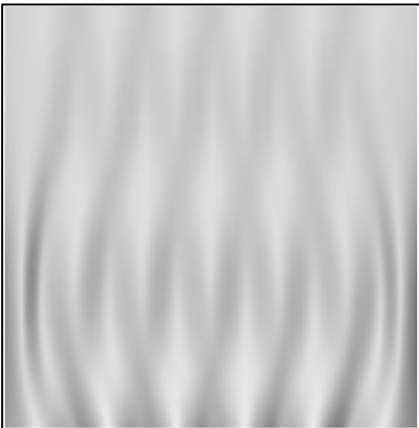


Proyección de sombra: 53.65%

Orientación Oriente - Poniente / Horarios 10am - 16pm



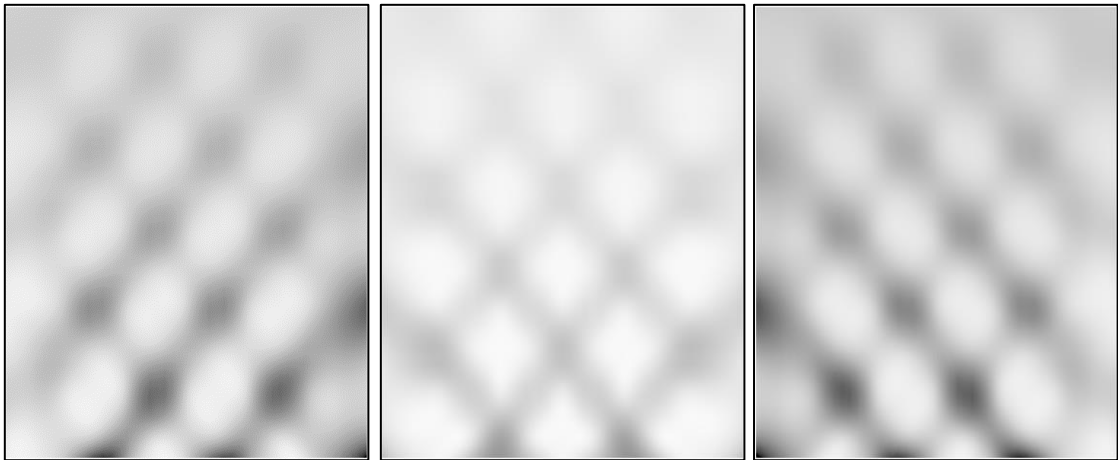
Proyección de sombra: 0%



Proyección de sombra: 0%

Cálculo de modelo MA_D16 / 21 de junio

Orientación Norte / Horarios 10am - 13pm - 16pm

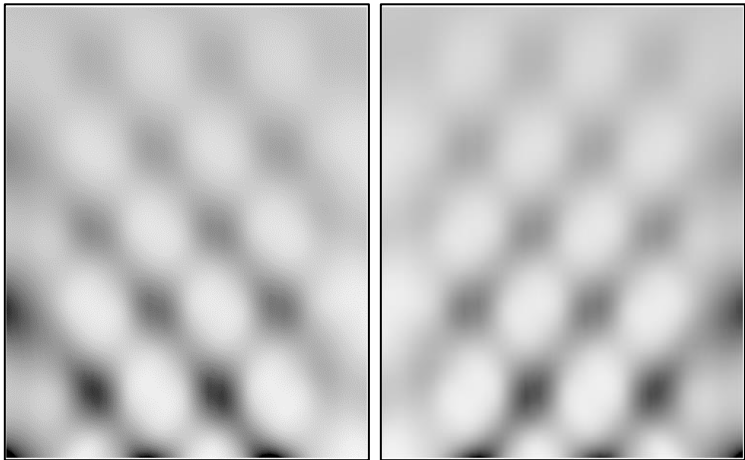


Proyección de sombra: 0%

Proyección de sombra: 0%

Proyección de sombra: 0%

Orientación Oriente-Poniente

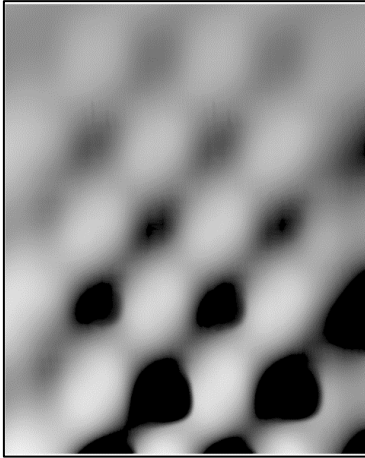


Proyección de sombra: 0.07%

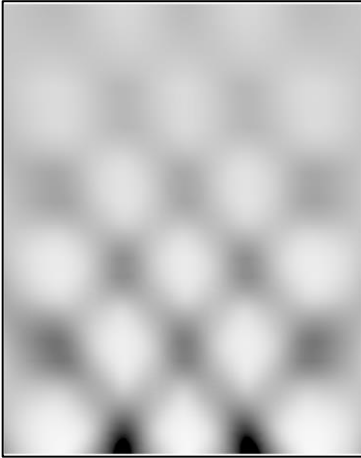
Proyección de sombra: 0.03%

Cálculo de modelo MA_D16 / 21 de septiembre

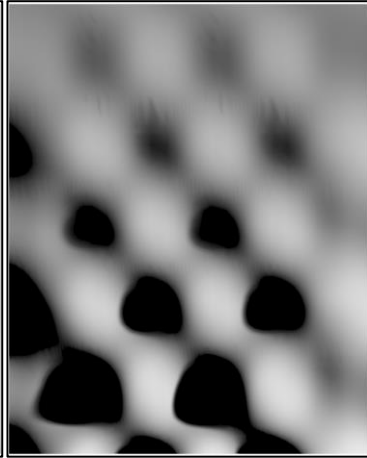
Orientación Norte / Horarios 9am - 13pm - 17pm



Proyección de sombra: 7.98%

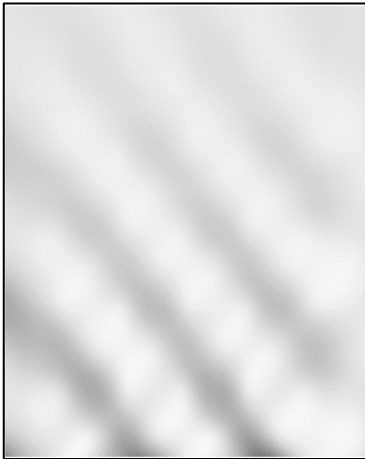


Proyección de sombra: 0.27 %

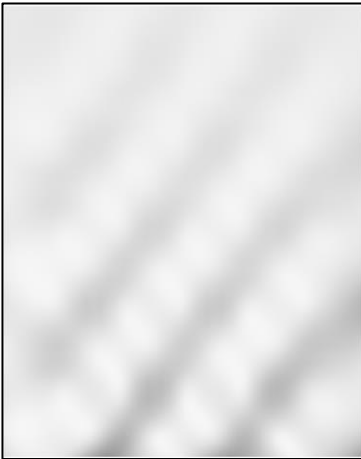


Proyección de sombra: 14.01%

Orientación Oriente-Poniente



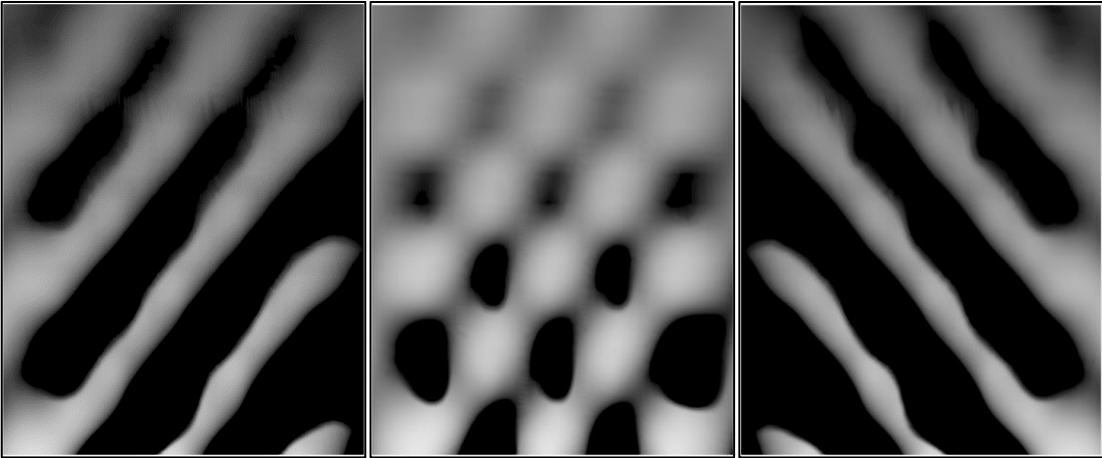
Proyección de sombra: 0%



Proyección de sombra: 0%

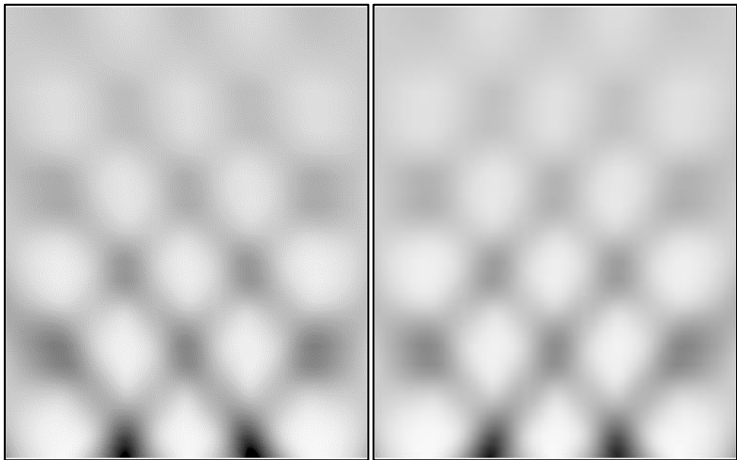
Cálculo de modelo MA_D16 / 01 de enero

Orientación Norte / Horarios 10am - 12pm - 16pm



Proyección de sombra: 38.32 % Proyección de sombra: 12.28% Proyección de sombra: 42.94%

Orientación Oriente - Poniente / Horarios 10am - 16pm



Proyección de sombra: 0% Proyección de sombra: 0%

Tabla 13. Resultados del desempeño térmico de prototipos en ciudad de Concepción.

Porcentaje de sombra sobre fachada				Radiación global horizontal (Wh/m²)				Auto sombreado (%)					Porcentaje autosombrado fachada norte	Ahorro de radiación sobre fachada (Wh/m²)				
				Promedio temperatura	Fachada Norte			Fachada Norte			Fachada Oriente	Fachada Poniente		Fachada Norte			Promedio diario	
Modelo de muro	Zona térmica	Fecha	Transmitancia térmica		Oriente	Norte	Poniente	Oriente	Norte	Poniente				Oriente	Poniente	Oriente		Norte
	MA_D9	E	01-ene	0,51	20,7	760	960	615	42,93	1,95	47,46	0,04	0,00	30,78	326,3	18,7	291,9	212,3
			21-sept		13,1	320	575	115	25,49	0,02	34,42	0,43	0,07	19,98	81,6	0,1	39,6	40,4
			21-jun		11,8	160	288	75	2,04	0,00	3,13	6,20	4,47	1,72	3,3	0,0	2,3	1,9
	MB_D14	E	01-ene	0,29*	20,7	760	960	615	49,26	4,34	56,65	0,00	0,00	36,75	374,4	41,7	348,4	254,8
			21-sept		13,1	320	575	115	22,85	0,00	32,67	0,04	0,00	18,51	73,1	0,0	37,6	36,9
			21-jun		11,8	160	288	75	2,01	2,01	2,50	3,97	3,09	2,17	3,2	5,8	1,9	3,6
	MA_D16	E	01-ene	1,05*	20,7	760	960	615	38,32	12,28	42,94	0,00	0,00	31,18	291,2	117,9	264,1	224,4
			21-sept		13,1	320	575	115	7,98	0,27	14,01	0,00	0,00	7,42	25,5	1,6	16,1	14,4
			21-jun		11,8	160	288	75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0

El modelo MB_D14 con una transmitancia térmica de 0.29 W/m²K. Logra auto sombrarse en 36.75% para verano reduciendo un 254.8 de 778. 18.51% en primavera reduciendo un 36.9 de 337. 2.17% en invierno reduciendo 3.6 de 174. Llegando a reducir un promedio de 98 (Wh/m²) de ahorro anual arrojando un total de radiación de 294 (Wh/m²) sobre la fachada norte.

El modelo MA_D16 con una transmitancia térmica de 1.05W/m²K., Logra auto sombrarse en 31.18% para verano reduciendo un 270.9 de 812. 7.42% en primavera reduciendo un 72.9 de 347. 0% en invierno. Llegando a reducir un promedio de 80 (Wh/m²) de ahorro anual, arrojando un total de radiación de 350 (Wh/m²) sobre la fachada norte.

Resumen informe de resultados

Tabla 14. Resultados del desempeño térmico de prototipos en las tres zonas térmicas.

Porcentaje de sombra sobre fachada				Radiación global horizontal (Wh/m²)				Auto sombreado (%)					Porcentaje autosombrado fachada norte	Ahorro de radiación sobre fachada (Wh/m²)				
				Promedio temperatura	Fachada Norte			Fachada Norte			Fachada oriente	Fachada poniente		Fachada Norte			Promedio diario	
Modelo de muro	zona térmica	Fecha	Transmitancia térmica		Oriente	Norte	Poniente	Oriente	Norte	Poniente				Oriente	Norte	Poniente		Oriente
	MA_D12	A	28-feb	1,10	22,1	590	1022	290	59,04	14,67	62,26	0,03	0,00	45,32	348,3	149,9	180,6	226,3
			21-sept		16,0	280	850	130	53,14	4,00	51,16	0,00	0,00	36,10	148,8	34,0	66,5	83,1
			21-jun		15,6	270	600	175	19,13	0,45	15,06	5,32	8,22	11,55	51,7	2,7	26,4	26,9
	MB_D12	A	28-feb	1,16	22,1	590	1022	290	60,08	26,53	63,21	0,36	0,17	49,94	354,5	271,1	183,3	269,6
			21-sept		16,0	280	850	130	50,82	14,66	49,06	0,00	0,00	38,18	142,3	124,6	63,8	110,2
			21-jun		15,6	270	600	175	13,81	1,61	11,35	3,56	5,86	8,92	37,3	9,7	19,9	22,3
	MB_D17	A	28-feb	3,11	22,1	590	1022	290	77,66	40,50	79,21	0,02	0,00	65,79	458,2	413,9	229,7	367,3
			21-sept		16,0	280	850	130	72,94	10,75	71,90	0,00	0,00	51,86	204,2	91,4	93,5	129,7
			21-jun		15,6	270	600	175	45,00	0,29	40,32	22,87	29,36	28,54	121,5	1,7	70,6	64,6
	MD_D13	D	21-dic	1,07	26,1	830	965	640	54,44	32,73	56,40	10,44	9,58	47,86	451,9	315,8	361,0	376,2
			21-sept		15,0	380	565	95	29,83	12,03	39,39	2,59	0,15	27,08	113,4	68,0	37,4	72,9
			04-jun		12,7	200	280	70	7,53	1,93	10,97	13,22	7,98	6,81	15,1	5,4	7,7	9,4
	ME_D13	D	21-dic	0,88	26,1	830	965	640	57,36	38,53	59,39	12,63	11,62	51,76	476,1	371,8	380,1	409,3
			21-sept		15,0	380	565	95	26,16	14,34	32,99	1,33	0,11	24,50	99,4	81,0	31,3	70,6
			04-jun		12,7	200	280	70	3,19	1,88	5,31	8,19	3,05	3,46	6,4	5,3	3,7	5,1
	MA_D14	D	21-dic	0,66 *	26,1	830	965	640	46,11	11,16	50,37	0,01	0,00	35,88	382,7	107,7	322,4	270,9
			21-sept		15,0	380	565	95	12,84	0,11	24,10	0,00	0,00	12,35	48,8	0,6	22,9	24,1
			04-jun		12,7	200	280	70	0,79	0,00	1,70	2,14	1,04	0,83	1,6	0,0	1,2	0,9
	MA_D9	E	01-ene	0,51	20,7	760	960	615	42,93	1,95	47,46	0,04	0,00	30,78	326,3	18,7	291,9	212,3
			21-sept		13,1	320	575	115	25,49	0,02	34,42	0,43	0,07	19,98	81,6	0,1	39,6	40,4
			21-jun		11,8	160	288	75	2,04	0,00	3,13	6,20	4,47	1,72	3,3	0,0	2,3	1,9
	MB_D14	E	01-ene	0,29*	20,7	760	960	615	49,26	4,34	56,65	0,00	0,00	36,75	374,4	41,7	348,4	254,8
			21-sept		13,1	320	575	115	22,85	0,00	32,67	0,04	0,00	18,51	73,1	0,0	37,6	36,9
			21-jun		11,8	160	288	75	2,01	2,01	2,50	3,97	3,09	2,17	3,2	5,8	1,9	3,6
	MA_D16	E	01-ene	1,05*	20,7	760	960	615	38,32	12,28	42,94	0,00	0,00	31,18	291,2	117,9	264,1	224,4
			21-sept		13,1	320	575	115	7,98	0,27	14,01	0,00	0,00	7,42	25,5	1,6	16,1	14,4
			21-jun		11,8	160	288	75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0

CAPÍTULO 4. Resultados y Discusiones

Los resultados del proceso de impresión lograron abarcar e interpretar los diámetros seleccionados de impresión, genero condicionantes que no fueron analizadas en un principio y sobre la marcha se fue puliendo y mejorando los resultados de las propuestas impresas de las pruebas siguientes.

Se experimento con las trayectorias desarrolladas para la investigación de Veronica Arcos logrando avanzar y definiendo características del proceso de impresión, tal como la definición de diámetro de boquilla la cual queda directamente relacionada a la altura de cada capa de trayectoria, de este modo el cordón extruido no arrastraría el cordón inferior. Dentro del proceso de desarrollo de prototipados no se alcanzan a desarrollar trayectorias que trabajen tridimensionalmente, pero pueden ser relevantes para el desarrollo y análisis de otras características en el diseño de las fachas, pueden dejar vanos en la fachada exterior y crear cámaras de aire ventiladas.

No se esperaba por otra parte la limitante de la capacidad de impresión del modelo a escala, y las características de la impresora. Se deben arreglar piezas en el procedimiento y queda limitado a utilizar cierto rango de boquillas, debido a que se “taparon” con mezcla, por acumulación de material en las paredes, complicación con las limpiezas post impresión, secado rápido de la mezcla, entre otras.

Otra de las condiciones, surgió a raíz de impresiones que quedan sin cavidades en su interior, ya que las impresiones requieren de un distanciamiento mínimo necesario para que al momento de imprimir no se traslapen los cordones de impresión y depende también de la fluidez del hormigón, la que varía según la preparación de la mezcla y la humedad utilizada.

Podemos observar que, de los resultados, los planteamientos de evaluación térmica resultan inversamente proporcionales, ya sea por el desarrollo geométrico o los elementos de relleno en las cavidades del muro.

Por una parte, entre mayor es la capacidad de proyección de sombra, las cavidades internas de los muros se ven reducidos y en ciertos puntos del muro donde hay mayor sombra en el rango del día, la transmitancia térmica del muro es mayor.

Cabe mencionar que las cámaras de aire estancas no son tan eficientes, ya que los valores de la tabla *“Resistencia térmica de capas de aire no ventiladas con superficies de alta emisividad”* Son valores que son muy bajos para la cámara de aire resultante en el diseño, desde 15mm de espesor la resistencia térmica se mantiene en $0.18\text{m}^2\text{K/W}$ es más factible ocupar aislante de relleno en todas las cámaras internas, aunque esta medida podría generar humedad intersticial al interior del muro, lo que reduciría la efectividad del aislante.

Otro enfoque en el diseño de los modelos se pudo haber definido a partir de las condicionantes o requerimientos de los manuales térmicos, de este modo establecer los distanciamientos mínimos y máximos entre paneles, colocando limite a las cámaras de aire estancas, optimizando el uso del material aislante. Quedando a modo de grilla dentro de que parámetros funciona esta iteración.

Las horas determinadas en la información climática de las ciudades, tuvieron que ser corregidas debido al rango de trayectorias en el que se debe evaluar para determinar el mejor desempeño del muro, este a oeste, y alguno de los horarios quedan orientados en suroeste o sureste, lo cual está fuera de la radiación solar incidente en la fachada norte. Esta corrección se realiza para analizar correctamente el desempeño de auto sombreado de los muros Se opta por ir avanzado desde este análisis sin la corrección de información preliminar para dar cuenta de lo mismo, entregando información al lector de esta observación y evitar de esta problemática en su investigación.

CAPITULO 5. Conclusiones

El desarrollo de esta memoria desde la elaboración de geometrías complejas hasta la impresión a escala de los modelos permite visualizar el resultado de las propuestas y si se tornan adecuadas para la aplicación de soluciones constructivas con un planteamiento de diseño pasivo en la arquitectura.

También las características del método constructivo permiten mayores libertades de diseño y reducción de tiempos de ejecución, pero con la necesidad de ir perfeccionando la técnica, un control riguroso del proceso, una mayor inversión en los equipos, mano de obra y material principalmente.

Como ramas de investigación asociadas a la impresión 3D está la evaluación estructural, dada la capacidad autoportante de la mezcla puede permitir avances mayores con la incorporación de elementos resistentes a la flexión, cualidad principal para dar validación al método constructivo. Se puede indagar como tema continuo en el desempeño térmico, la incorporación de material de baja conductividad térmica en el desarrollo de la mezcla. Verificar métodos de inyección aislante en las cavidades internas del muro.

Finalmente, gracias al resultado de fachadas que se optimizan para sombrearse, dan lugar a la incorporación de material aislante hacia las cavidades del muro, logrando reducir la transmitancia térmica de un muro con espesor de material similar, dado a una menor conductividad en el material granulado y una mezcla con características especiales para la impresión.

Otro tema ligado a la continuidad de este trabajo es el desarrollo de geometrías que permitan fachadas ventiladas, incorporando la evaluación del viento como condicionante en el diseño de edificaciones pasivas. Proyectando a llegar al diseño y evaluación de prototipos de edificaciones, principalmente viviendas por la escala y problemática presente como motivación de esta memoria.

De este modo se puede plantear un diseño especializado de la envolvente de la edificación para adaptarse de mejor manera a su contexto específico, respondiendo a condiciones del diseño pasivo y apuntar a la

reducción de emisiones, gracias a la reducción de la ganancia solar sobre un 50% en las horas de mayor incidencia solar y en invierno aumentarlas por la inclinación solar y el diseño de cada fachada, pudiendo establecer el diseño que mejor se adecua a cada orientación. De este modo el desarrollo geométrico del diseño de los muros si confirma la hipótesis de la mejora de la envolvente vertical de la edificación.

Por otro lado, la cámara de aire estanca no genera muchos aportes en la reducción de la transmitancia térmica del muro, llegando a tener un mejor desempeño el mayor espesor de muro según el diámetro de boquilla, para el mismo espesor de muro.

REFERENCIAS

- Campillo Mejías, M. (13 de Junio de 2017). Prefabricación en la arquitectura: Impresión 3D en hormigón. Madrid.
- Curth, A., Brodesser, T., Sass, L., & Mueller, C. (2021). Multi-objective optimization of 3D printed shell toolpaths. *Proceedings of the IASS Annual Symposium 2020/21 and the 7 th International Conference on Spatial Structures*. Guilford.
- D'Alençon Castrillón, R. (2008). *Acondicionamientos, Arquitectura y técnica* (Primera ed., Vol. II). (P. Mardones Hiche, Ed.) Santiago, Chile: Ediciones ARQ.
- Ester Pujadas-Gispert, M. A. (2020). Design, construction, and thermal éformance evaluation of an innovative bio-based ventilated façade. *Frontiers of Architectural Research*, 9(3), 681-696. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.foar.2020.02.003>.
- García Alvarado, R. (21 de Diciembre de 2020). *Construcción impresa-3D en la Universidad del Bío-Bío: oportunidad única de innovación*. Obtenido de Contruye 2025: <https://construye2025.cl/2020/12/21/construccion-impresa-3d-en-la-universidad-del-bio-bio-oportunidad-unica-de-innovacion/>
- García Alvarado, R., Martínez, A., Auat Cheein, F., & González Böhme, L. (2020). Proyections of 3D-printed construction in Chile. *Revista ingeniería de la construcción*, 35(1), 60-72.
- García Cuevas, D., & Pugliese, G. (2020). *Advanced 3D printing with Grasshopper*. Independently published.
- Hernández Álvarez, M., Esparza López, C. J., & Ojeda Sánchez, J. (2020). Análisis del desempeño térmico de una fachada ventilada en clima cálido. En U. A. Coahuila, *¿Se puede hacer una ciudad inteligente?* (págs. 185-199). Coahuila, México.

- Instituto Nacional de Normalización. (2021). *NCh 853:2021 : Componentes y elementos para edificación - Resistencia térmica y transmitancia térmica - Métodos de cálculo*. Santiago.
- López Vidal, A., Chica Páez, J. A., & Ramírez Collado, V. (2018). Una primera aproximación a la impresión 3D: posibilidades de los materiales con base cementicia. *Revista Técnica Cemento Hormigón*(984), 52-55.
- Shahda, M. M. (2020). Self-Shading Walls to Improve Environmental Performance in Desert Buildings. *Architecture Research*, 10(1), 1-14. doi:10.5923/j.arch.20201001.01
- Souza, E. (14 de Junio de 2019). "*¿El futuro de la vivienda social podría ser la impresión 3D?*" [*O futuro das Habitações Sociais pode ser a impressão em 3D?*]. Obtenido de Plataforma Arquitectura: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/919041/el-futuro-de-la-vivienda-social-podria-ser-la-impresion-3d>
- Tedeschi, A. (2014). *AAD Algorithms-Aided Design. Parametric strategies using Grasshopper*. Milano: Le Penseur.
- Torres, M. (2021). *El Déficit Habitacional Cuantitativo en Chile*. IdeaPaís. Obtenido de <https://ideapais.cl/wp-content/uploads/2021/12/2021-12-01-Estudio-Deficit-Habitacional.pdf>
- United Nations Environment Programme. (2021). *2021 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector*. Nairobi.
- Wiche Latorre, P., Rodríguez Droguett, B., & Bianchi Granato, D. (2020). *Estado del Arte de Huella de Carbono para Edificaciones: Resumen para Tomadores de Decisiones*. Instituto de la Construcción, Santiago, Chile.

Yoon-Si , L., Sihyun, K., & Grant, H. (2018). 3D Printing in Concrete Materials and its Applications. *Research Publish Journals*, 6(1), 187-195.