

Sobre el uso de Impresión 3D en la reparación de lesiones constructivas en viviendas sociales.

Estudiante: Sofia Vega Raviola

Profesor guía: Pedro Soza

Universidad de Chile, Facultad de Arquitectura y Urbanismo

Resumen

Esta investigación, propone la reparación de patologías producto de lesiones mecánicas en conjuntos de viviendas sociales colectivas. Específicamente, el trabajo se enfoca en el análisis de casos de lesiones en núcleos de circulaciones verticales y horizontales. El diseño del estudio contempló el levantamiento de las patologías usando fotogrametría, para posteriormente crear un modelo digital de las lesiones, y a partir de dicho modelo, generar con impresión 3D una pieza fidedigna a la realidad, que pudiese usarse para reparar las lesiones detectadas.

El objetivo de esta investigación fue comprobar la factibilidad de llevar adelante este tipo de desarrollo, así como conocer el estado de madurez tecnológico para implementar el uso masivo de estas tecnologías en la generación de un sistema automatizado de reparación de viviendas sociales. Finalmente, se modeló el flujo de trabajo explorado a modo de contribución metodológica para el desarrollo de futuras investigaciones en el área.

Palabras clave: Impresión 3D, déficit cualitativo de viviendas, lesiones mecánicas

1. Introducción

Este trabajo se enfoca en la posibilidad de reparar lesiones mecánicas usando tecnología de impresión 3D. Ello en el contexto de que la presencia de lesiones mecánicas es una de las mayores problemáticas que posee Chile frente a su problema de déficit habitacional, particularmente en su arista cualitativa. Al respecto, la Cámara Chilena de Construcción menciona que al año 2022, existen grosso modo, un millón 450 mil viviendas con alto deterioro cualitativo producto de lesiones mecánicas (CChC, 2022), las que se pueden agrupar en tres categorías, déficit de ampliación, déficit de servicios básicos y déficit de mejoramiento de material y de conservación. Este último grupo se caracteriza porque las viviendas que están en el presentan materialidad recuperable y/o estado de conservación malo.

Esta investigación se focaliza en este grupo, e indaga específicamente el uso de nuevas tecnologías existentes en la industria AEC que puedan emplearse en el mejoramiento de las lesiones mecánicas detectadas en estas viviendas. Para ello también se analizará el origen de dichas lesiones, comúnmente producidas por la sobrecarga de algún elemento de la edificación, debido a fuerzas externas o internas, provocándose así, grietas o desprendimiento de material (Broto, 2005)

Por otro lado, el uso de la tecnología de impresión 3D en hormigón se ha expandido enormemente en los últimos años, produciendo una serie de ventajas dentro de la industria AEC y un gran potencial de desarrollo para la arquitectura en concreto, caracterizada por una libertad para la creación de geometrías diferentes, consumo reducido de material, automatización y una cadena de construcción mas corta (Breseghello, 2022). Por lo mismo, en esta investigación se hipotetiza que esta tecnología, al poseer esta serie de ventajas, podría ser de gran utilidad si se implementara en la reparación de viviendas de hormigón armado.

Dicha hipótesis se apoya en diversos estudios que han investigado el uso de la impresión 3D, dentro de la industria de la construcción (Breseghello, 2022), así como en investigaciones académicas produciendo y analizando en su mayoría piezas por separado, como muros, fundaciones, columnas, losas y techos (García-Alvarado, 2021). El uso de impresión 3D también se ha implementado en grandes proyectos que demuestran el potencial de desarrollo que esta tecnología tiene a gran escala. A modo de ejemplo comúnmente se cita el caso de Winsun, una compañía de arquitectura China que construyo satisfactoriamente un conjunto de viviendas de 200m2 en Shanghái (Yuhong, 2014) demostrándose así que esta tecnología es capaz de aplicarse en para grandes proyectos.

Esto deja en evidencia que, si bien el uso de la impresión 3D ha tenido un gran recorrido plagado de avances y pruebas en la creación de piezas por separado e incluso en su implementación en grandes proyectos de construcción de vivienda, su uso no se ha considerado – hasta donde sabemos – como tecnología de reparación de lesiones en elementos de hormigón o concreto. Esta carencia genera gran motivación y oportunidad para experimentar e investigar el uso de esta tecnología en la reparación de elementos y piezas existentes.

Es importante considerar que el uso de esta tecnología, pese a permitir y facilitar los avances antes mencionados, también conlleva desventajas. Entre ellas están el tiempo necesario para imprimir una pieza, ya que, el material se oxida y se seca, y las limitaciones de tamaño debido a la escala que poseen las máquinas, lo que incide el tamaño máximo de las piezas a imprimir (Peng Wu, 2019). Así, este trabajo busca dilucidar si ¿es factible capturar información de la realidad para crear una pieza que funcione como reemplazo de una lesión mecánica? El objetivo principal planteado es estudiar y proponer un flujo de trabajo que considere y relacione diferentes tecnologías empleadas en reparar elementos y piezas arquitectónicas afectadas por lesiones mecánicas. Para ello esta investigación se focalizará en un caso real, el edificio “El buque” en la comuna de Pedro Aguirre Cerda, donde se evaluarán y seleccionarán algunas de las muchas lesiones mecánicas existentes en el espacio común y público del conjunto, específicamente en los núcleos de circulaciones vertical y horizontal.



Imagen 1. Resumen motivación. Fuente: Elaboración propia.

2. Antecedentes

A continuación, se presentan los antecedentes que fundamentan esta investigación, separados en 4 secciones, las problemáticas de las viviendas sociales, las lesiones dentro de las viviendas, el uso de la impresión 3D y sus detalles, y finalmente detalles operativos relevantes respecto del uso de los programas que se usaran para llevar a cabo la investigación.

2.1. Viviendas sociales

Para comenzar el estudio es crucial entender la definición de déficit habitacional. El informe de la Fundación Vivienda en el 2018 define el déficit como “ la cantidad de viviendas que faltan para dar satisfacción a las necesidades de una determinada población (Fundación Vivienda, 2018), y a su vez indica que el déficit se puede separar en dos categorías principales, déficit cualitativo y cuantitativo como muestran las tablas 1 y 2 a continuación(Fundación Vivienda, 2018).

Tabla 1. Déficit Cuantitativo. Fuente: Fundación Vivienda 2018.

Déficit	MINVU	CChC
Déficit Cuantitativo	<p>Considera:</p> <p>(a) Viviendas irrecuperables, que son el hogar principal residentes en viviendas irrecuperables según índice de calidad global de la vivienda (que el tipo de vivienda o materialidad en muros, piso o techo sea irrecuperable).</p> <p>(b) Hogares allegados (allegamiento externo); Hogares adicionales al hogar encuestado según lo reportado por el hogar principal interno y que presenten hacinamiento medio o crítico.</p> <p>(c) Allegamiento interno; núcleos familiares adicionales al principal en hogares con allegamiento interno y que presenten hacinamiento medio o crítico.</p> <p>Un hogar se considera con déficit si presenta uno de los requerimientos mencionados; es excluyente.</p>	<p>Para la metodología de la CChC el símil de “déficit cuantitativo” son los RHA, más en esta estimación solo considera allegamiento externo e interno.</p> <p>Considera:</p> <p>(a) Hogares allegados (allegamiento externo); Hogares adicionales al hogar encuestado según lo reportado por el hogar principal interno y que presenten hacinamiento medio o crítico.</p> <p>(b) Allegamiento interno; núcleos adicionales al núcleo principal del hogar en hogares con allegamiento interno y que presenten hacinamiento medio o crítico.</p> <p>NOTA: Un cálculo importante que se realiza en la estimación de la CChC, es estimar una “tasa natural de allegamiento”, la cual tiene como función aproximar la proporción de población allegada que “elige” compartir el hogar con otro núcleo, independientemente de sus recursos económicos.</p>

Tabla 2. Déficit Cualitativo. Fuente: Fundación Vivienda 2018.

Déficit Cualitativo	<p>Considera:</p> <p>(a) Déficit de ampliación; hogares principales que presentan hacinamiento medio, alto o crítico y que no tienen allegamiento interno (excluidas viviendas irrecuperables).</p> <p>(b) Déficit de servicios básicos; hogares principales que presentan saneamiento deficitario (excluidas viviendas irrecuperables).</p> <p>(c) Déficit de mejoramiento material y conservación; hogares principales que presenten materialidad recuperable y/o estado de conservación malo (excluidas viviendas irrecuperables).</p> <p>Un hogar puede presentar los tres requerimientos, no son excluyentes.</p>	<p>Para la metodología de la CChC el símil de “déficit cualitativo” son los RHD, más en esta estimación se abordan aquellas viviendas irrecuperables (el MINVU las incluye dentro de su “déficit cuantitativo”).</p> <p>Considera:</p> <p>(a) El total de estos requerimientos se construye sobre la base de dos criterios: un Índice de Materialidad y el Tipo de Vivienda. Cada uno de estos discernimientos contiene la información necesaria para contabilizar si se necesita una nueva vivienda o no.</p> <p>(b) Viviendas irrecuperables, que son hogares que reside en viviendas deficitarias en materialidad, es decir, se definirá a una vivienda como deficitaria si el estado de los muros es “malo” según el índice de materialidad, aun cuando el techo y/o el piso tengan calificación de “bueno” o “aceptable”.</p> <p>(c) Según el tipo de recinto habitacional, esta podrá clasificarse como “semipermanentes” (mediagua, choza, vivienda precaria, etc.). Por lo tanto, una vivienda semipermanente sumará un nuevo requerimiento habitacional.</p>
----------------------------	--	---

Posteriormente, en el 2020 y 2021 la ONG Un Techo para Chile hizo notar como repercutía el problema del déficit habitacional, indicando que su aparición correspondía un síntoma de un problema aun mayor, el cual es la falta de acceso a una vivienda adecuada para la población más vulnerable (TECHO, 2021). Esta organización indicaba así que la precariedad habitacional es una de las razones por las cuales las personas optan por vivir en campamentos. Debido a esto, señalan que no solo hay que enfocarse en los campamentos, sino que además hay que trabajar en cómo las personas llegan a la decisión final de conformar un campamento.

Por otro lado, uno de los estudios presentados por la Cámara Chilena de Construcción menciona que existen cerca de un millón 450 mil viviendas con alto deterioro, señalando también la importancia de enfocarse en el mejoramiento de viviendas para atenuar dicho problema, y que este no se convierta en algo aún más deficitario (CChC, 2022)

2.2. Caracterización de Lesiones

Para entender cómo se dividen los tipos de viviendas y como se distribuyen las viviendas recuperables, durante el año 2019, la Cámara Chilena de la Construcción hizo otro estudio, llamado Balance de Vivienda y Entorno Urbano, el cual detalló los requerimientos habitacionales por deterioro. Con este trabajo, se creó un índice de materialidad de viviendas, lo que permitió clasificarlas acorde a dicho índice. En él las viviendas de hormigón armado se clasificaron de buenas.

Tabla 3. Clasificación de los componentes de las viviendas de acuerdo a su material de construcción. Fuente: CChC 2019.

CLASIFICACIÓN	MURO	TECHO	PISO
Bueno (B)	Hormigón armado; Albañilería (bloque cemento, piedra o ladrillo); Tabique forrado por ambas caras (madera, lata, u otro).	Tejas o tejuela (arcilla, metálica, cemento, madera, asfáltica); Losa hormigón; Planchas metálicas (zinc, cobre, etc.) o fibrocemento (pizarreño).	Parquet, madera, piso flotante o similar; Cerámica, flexit o similar; Alfombra o cubrepiso; Baldosa de cemento; Radier.
Aceptable (A)	Adobe, barro, quincha, pirca u otro artesanal tradicional; Tabique sin forro interior (madera u otro).	Paja, coirón, totora o caña.	Enchapado de cemento.
Malo (M)	Materiales precarios o de desecho o cualquier material si la conservación es mala.	Fonolita o plancha de fieltro embreado; Materiales precarios o de desecho; Sin cubierta en el techo; Cualquier material si la conservación es mala.	Tierra o cualquier material si la conservación es mala.

Posteriormente, y teniendo en cuenta esta clasificación, se generó una segunda tabla con el índice de materialidad que considera el estado de las estructuras:

Tabla 4. Conformación del índice de materialidad de la vivienda según la clasificación conjunta de sus componentes. Fuente: CChC 2019.

ÍNDICE DE MATERIALIDAD	MURO	TECHO	PISO
Bueno	B	B	B o A
Aceptable	A B	B o A A	B o A B o A
Recuperable	B o A B o A B o A	B o A M M	M B o A M
Deficitaria	M	B o A o M	B o A o M

Esta clasificación, mostrada en la tabla 4, servirá como punto inicial para clasificar la calidad de las estructuras particulares en posibles casos de estudio, así como el que estas cumplan con el requisito de ser una vivienda “recuperable” (CChC, 2019)

En el grupo de las viviendas recuperables, se ubican las viviendas que posean lesiones mecánicas, o sea, que debido a un esfuerzo mecánico externo se producen fisuras, grietas o desprendimiento de material (Broto, 2005)

Finalmente, también se considera el Manual de refuerzos y reparaciones del MINVU como referencia válida para caracterizar patologías y lesiones mecánicas, dado que este manual especifica los pasos necesarios para reemplazar un volumen de hormigón tradicional, una pieza o elemento nuevo.

Específicamente se consideran los pasos de preparación de superficie, procedimiento de vaciado, compactación y finalmente el curado del hormigón /MINVU, 2018)

2.3. Impresión 3D

La impresión 3D se desarrolló a partir de 1980, pero solo recientemente ha logrado ganar reconocimiento como una tecnología útil en la industria de la construcción (Shirowzhan, 2020).

La impresión propiamente tal consiste en un proceso de extrusión mediante la adición de una serie de capas bidimensionales, las que se generan a partir de un cordón de hormigón, u otra mezcla cementaria inyectada por la impresora. Estas capas son formadas primero virtualmente, y al ser extrusionadas se materializan en elementos y piezas reales (Teizer, 2016). Para ello previamente es necesario desarrollar diseños tridimensionales de lo que se requiere imprimir, usualmente modelos 3D. Estos modelos posteriormente deben convertirse a código G, que es el código utilizado por las impresoras 3D. En dicho código se especifica la ruta que seguirá el cabezal de impresión, y producto de ello estas capas serán formadas a través de la extrusión del material.

El material, impulsado por una bomba, es expulsado mediante una boquilla, la que determinará directamente la capacidad de impresión, forma y fluidez de la mezcla (Shakor, 2019).

El proceso de generación computacional y posterior impresión 3D consta de los siguientes pasos:

1. Comando del sistema: El cual generará el código que posteriormente se introduce a la robot.
2. Controlador del robot: Comando que controla la robot.
3. Controlador de la impresión: comando que controla la impresión.
4. Brazo robótico: Encargado de realizar los movimientos según el código ingresado.
5. Cabezal de impresión: es el cual permite imprimir objetos en impresión 3D.
6. Agente acelerador de hormigón: Aditivo que se le agrega a la mezcla para acelerar su fraguado.
7. Bomba peristáltica para agente acelerador: bombea la mezcla.
8. Bomba peristáltica para premezcla: dispositivo hidráulico que transporta la mezcla.
9. Objeto impreso

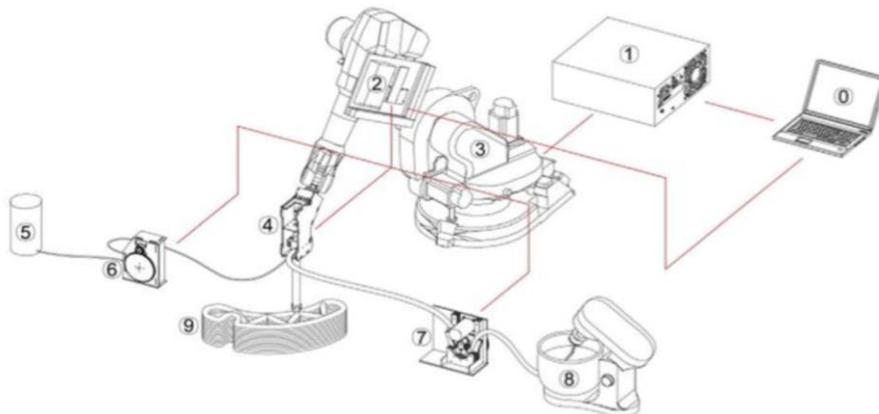


Imagen 2: Componentes sistema de impresión 3D. Fuente: Large-Scale 3D Printing: The Way Forward.

La fabricación de elementos en impresión 3D ofrecen varias ventajas, tales como: el control computacional de las secciones y el corto tiempo de producción al imprimir piezas en 3D previamente diseñadas (teizer, 2016)

Por otro lado, además de poseer ventajas, posee desafíos a mejorar, como el uso de enfierraduras o barras de refuerzo dentro del uso de los elementos impresos, algo muy relevante en la creación de la piezas y elementos críticos en viviendas sociales, considerando la realidad sísmica nacional, Es por esto que la importancia de la búsqueda de las incorporaciones de filamentos al hormigón para que sea reforzado es un gran desafío aún (Doyle, 2019).

Otra de las limitaciones que posee la impresión 3D en hormigón, es el tiempo máximo para imprimir una pieza, ya que el material se oxida y seca, y las limitaciones de tamaño debido a las dimensiones de las impresoras 3D (Wu, 2016). A modo de ejemplo, la impresora KUKA KR120 – 250, robot industrial de 6 ejes de libertad, posee un área de trabajo que alcanza los 2,4 mts, el que se detalla en la imagen 2.

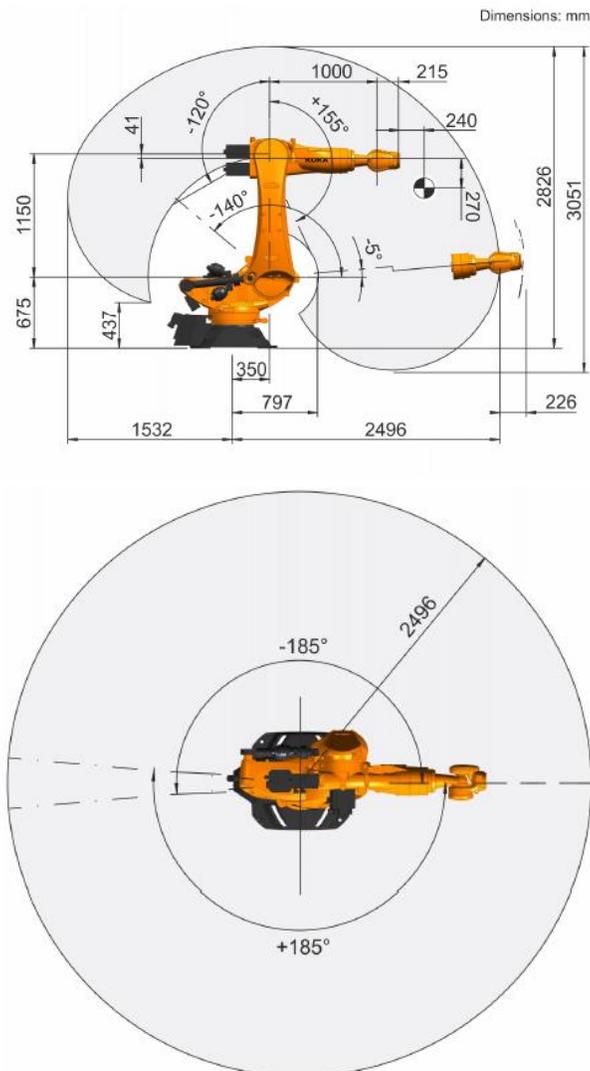


Imagen 3. Área de trabajo KUKA 120 R2500 pro. Fuente: www.kuka.com

Con miras a comprender las formas básicas posibles que se pueden crear con esta tecnología, los investigadores han estudiado los distintos proyectos desarrollados con ella, buscando determinar las características estructurales. Entre ellos, Alvarado (2021) ha propuesto la categorización que presenta la tabla 5.

Tabla 5. Características del edificio. Fuente: Alvarado, 2021.

Características	Alternativas
Elementos impresos	<ol style="list-style-type: none"> 1. Fundaciones 2. Pisos 3. Muros y columnas 4. Losas 5. Techos
Arreglo de Filamentos	<ol style="list-style-type: none"> 1. Único 2. Paralelo, vacío 3. Paralelo, con grilla 4. Paralelo, lleno 5. Otro
Refuerzos	<ol style="list-style-type: none"> 1. No reforzado 2. Barras horizontales 3. Barras verticales con relleno 4. Refuerzo concentrado
Aperturas	<ol style="list-style-type: none"> 1. Sin aperturas 2. Vertical 3. Horizontal 4. Cuadrado 5. Otro
Techo	<ol style="list-style-type: none"> 1. Sin techo 2. Inclinado (Hormigón, madera, metal) 3. Plano (Hormigón, madera, metal) 4. Impreso, plano 5. Impreso, echado 6. Impreso, curvo
Geometría	<ol style="list-style-type: none"> 1. Solo líneas rectas 2. Esquinas redondeadas 3. Tramos curvos 4. Completamente curvado 5. 3D curvo

Esta caracterización permite identificar desde el inicio la creación de secciones como las losas y muros. Estos dos tipos de elementos se encontraron en todos los casos estudiado.

2.4. Programas utilizados en el desarrollo de la investigación

En el desarrollo de esta investigación se usaron, primariamente 2 programas. El primero de ellos se utilizó para capturar y transferir información, y el segundo para corregir el modelo y preparar el archivo de impresión 3D. Este software incorporó además el uso de plugins especializados.

2.4.1. Agisoft

Agisoft es un software que se utiliza para hacer fotogrametrías a través de la generación de modelos geométricos tridimensionales, los que son creados a partir de imágenes digitales aéreas. Los

algoritmos de Agisoft están optimizados para generar una malla geométrica a partir de una nube densa de puntos, la que resulta del análisis espacial de las imágenes – fotografías – introducidas a la aplicación. Los modelos geométricos que genera Agisoft son modelos poligonales editables.

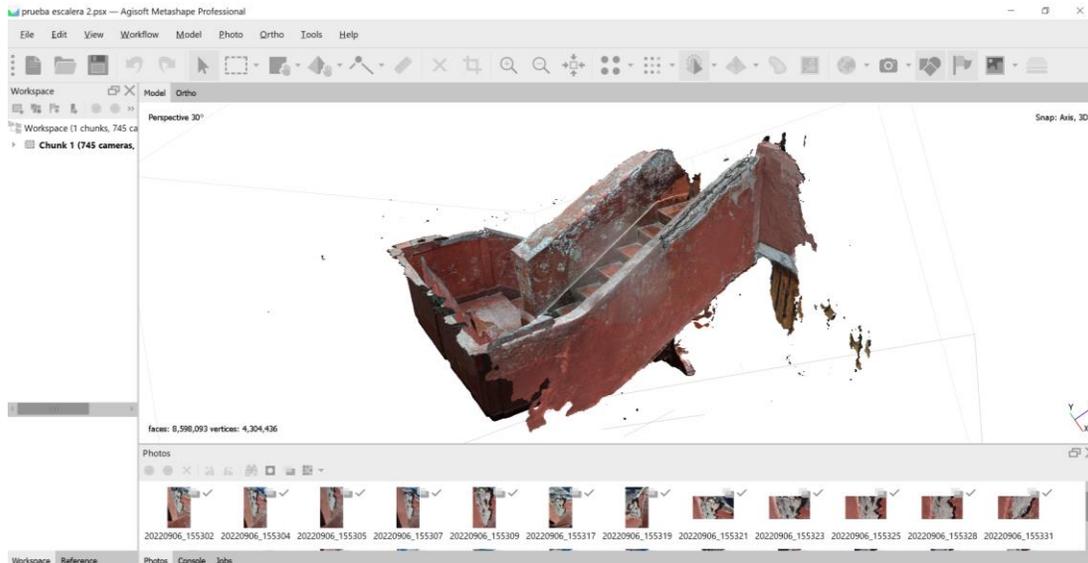


Imagen 4. Agisoft. Fuente: Elaboración propia.

2.4.2. Rhinoceros

Este programa, comúnmente utilizado en la modelación 3D de formas libres, ofrece la precisión necesaria para el diseño de piezas y prototipos de cualquier producto. Rhinoceros permite además la creación y edición de puntos, curvas, superficies, sólidos y mallas (Rhinoceros, 2022).

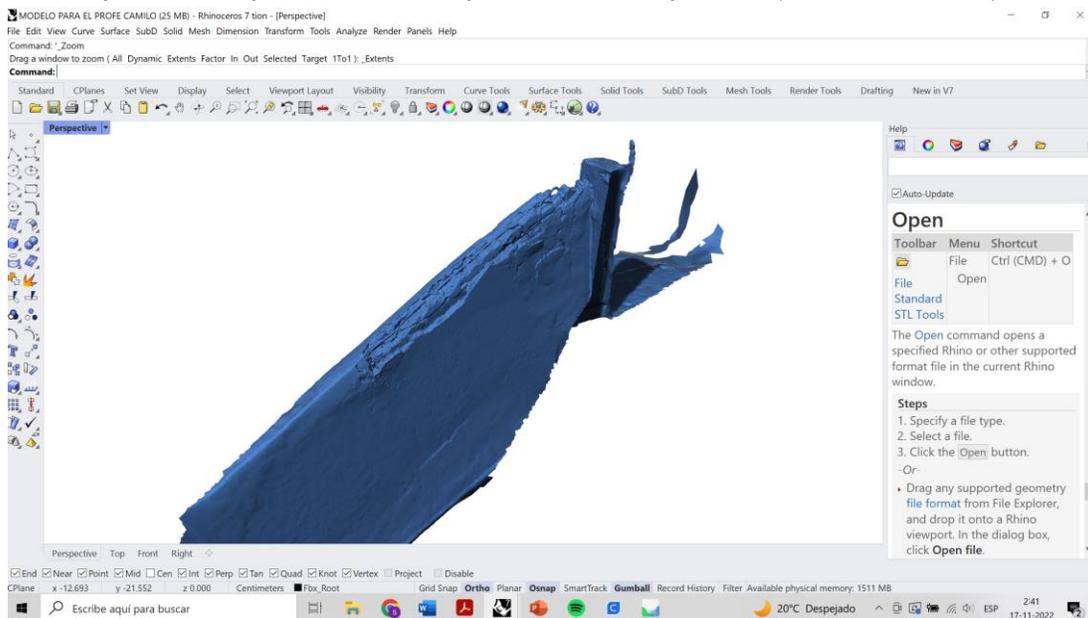


Imagen 5. Programa Rhinoceros. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, el programa, puede aumentar significativamente sus capacidades con el uso de plugins. En el desarrollo de esta investigación se considera el uso de Grasshopper, interfaz gráfica

de programación visual, y KUKA|prc es uno de ellos, que permite la configuración, control e integración directa con un robot KUKA en un entorno paramétrico. Así, KUKA|prc es capaz de generar una simulación del recorrido del brazo robótico KUKA, para asegurar que no existan colisiones o puntos inalcanzables en el área de impresión, permitiendo así corregir de manera anticipada o inmediata los problemas presentados en un entorno de simulación, antes de imprimir la pieza definitiva.

Además, KUKA|prc posee una biblioteca de los modelos de robot impresores 3D, facilitando así la posterior elección del robot con el que se trabajará (Robots in Architecture, 2022)

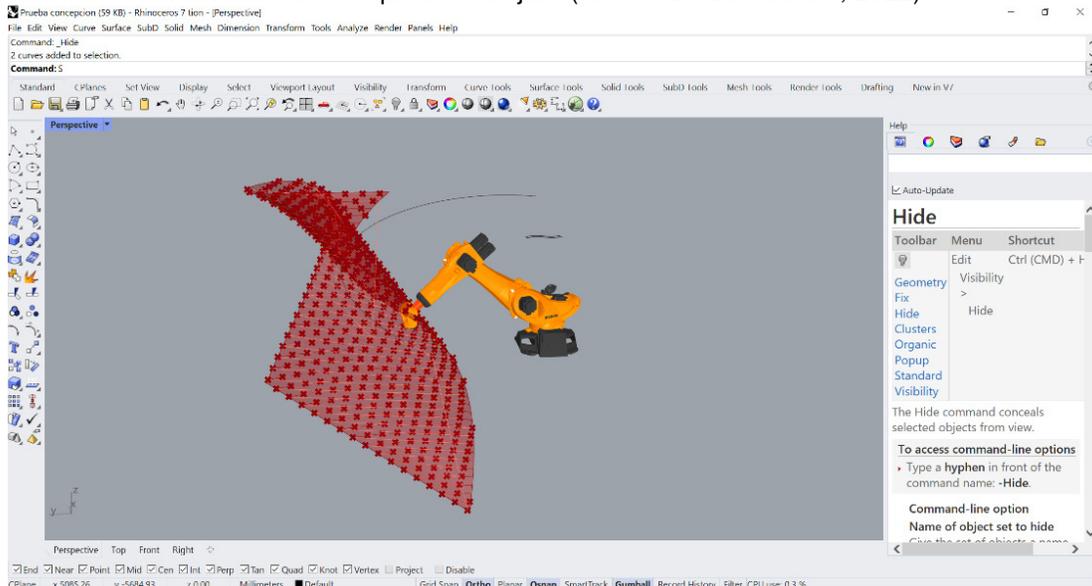


Imagen 6. Programa Rhinoceros con Plugin KUKA|prc. Fuente: Elaboración propia,

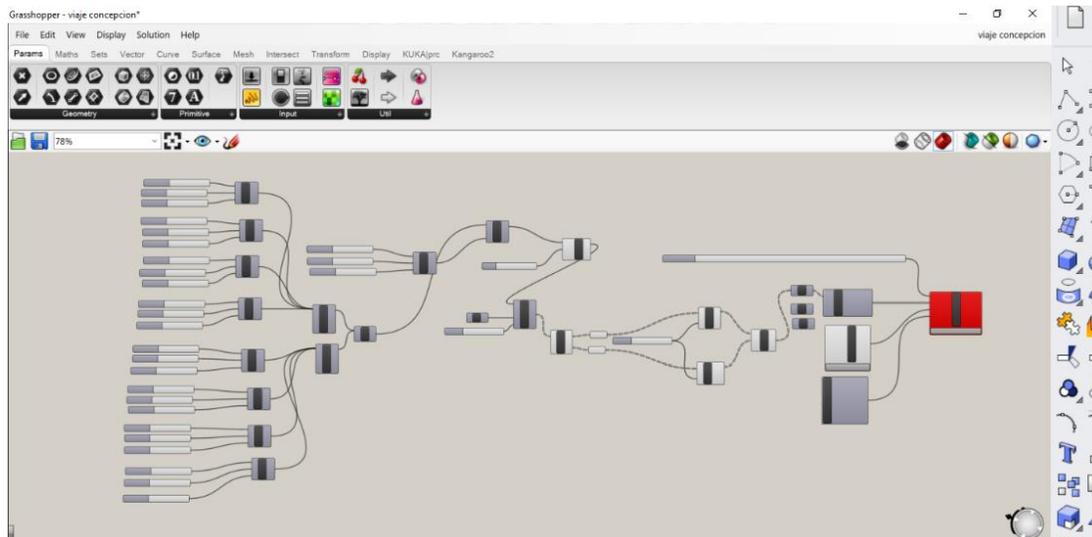


Imagen 7. Desarrollo de algoritmo de diseño y programación de robot para impresión 3d en Grassgopper. Fuente: Elaboración propia en base a workshop?

3. Métodos

El diseño de la investigación consta de 7 pasos los cuales se presentarán a continuación:



Imagen 8. Pasos metodología. Fuente: Elaboración propia.

3.1. Elección caso de estudio

Se optó por estudiar la copropiedad de “El buque”, ubicado en Av. Carlos Valdovinos 1640, en la comuna de Pedro Aguirre Cerda, debido a que poseía patologías ad-hoc a las lesiones mecánicas definidas como caso de estudio en esta investigación. La estructura del edificio “El buque” es de hormigón armado y presenta desprendimiento de hormigón y enfierraduras a la vista en el área de la circulación horizontal y vertical. Se eligieron estas áreas debido a que son mas accesibles para hacer el levantamiento y análisis general. Las imágenes 10, 11 y 12, muestran los daños en elementos de hormigón en las áreas seleccionadas.



Imagen 9. El buque. Fuente: Kamila Maldonado.

3.2. Realización de entrevistas desestructuradas

Como segundo paso se consideró hacer entrevistas para cada etapa en la que se necesitaran validar con expertos el desarrollo de las distintas etapas de la investigación.

Primero se tuvo la reunión con la profesora Elizabeth Ávalos ya que ella es experta en la térmica de viviendas sociales. Posteriormente se consideraron reuniones con profesores expertos en el área de la construcción, Francis Pfenniger, Verónica Veas y Mauricio Loyola. Por otro lado, se contactó con el arquitecto Diego Ramírez, que se dedica a hacer fotogrametrías y levantamientos con escáner laser 3D. Finalmente, también se consideraron reuniones con profesores expertos en modelamiento 3D e impresión digital, Camilo Guerreo para el conocimiento de Rhinoceros y Grasshopper y Paula Ulloa de la Universidad del Bío Bío para impresión 3D, Rhinoceros, Grasshopper y KUKA prc.

3.3. Evaluación y levantamiento de lesiones – casos de estudio

Se completaron 3 diferentes visitas al edificio en estudio para la captura de imágenes con miras a la creación de fotogrametrías. La primera visita se enfocó en el conocimiento principal de las lesiones que existan dentro de la copropiedad. En este proceso se obtienen las primeras fotos y la selección de las 3 lesiones mecánicas que se usarían dentro del estudio.



*Imagen 10. Caso 1.
Fuente: Elaboración propia*



*Imagen 11. Caso 2
Fuente: Elaboración propia*



*Imagen 12. Caso 3.
Fuente: Elaboración propia*

Las 2 visitas siguientes permitieron capturar más imágenes y mejorar el desarrollo de las fotogrametrías. Durante este tiempo, se concretó la reunión con Diego Ramírez, obteniendo así una guía en el proceso de levantamiento fotogramétrico y calibración con el software Agisoft.

3.4. Desarrollo de fotogrametrías

Durante la segunda visita al edificio “El buque” se tomaron aproximadamente entre 70 y 80 fotografías para procesar cada lesión en Agisoft. Tras hacer el primer levantamiento, debido a la falta de precisión de algunas fotos, para del proceso se tuvo que repetir, debido a errores e inconsistencias dentro de las primeras fotogrametrías. Durante la tercera visita se completo una nueva ronda de fotos para cada caso de lesiones y así un resultado más fidedigno tras procesar las imágenes en el programa.

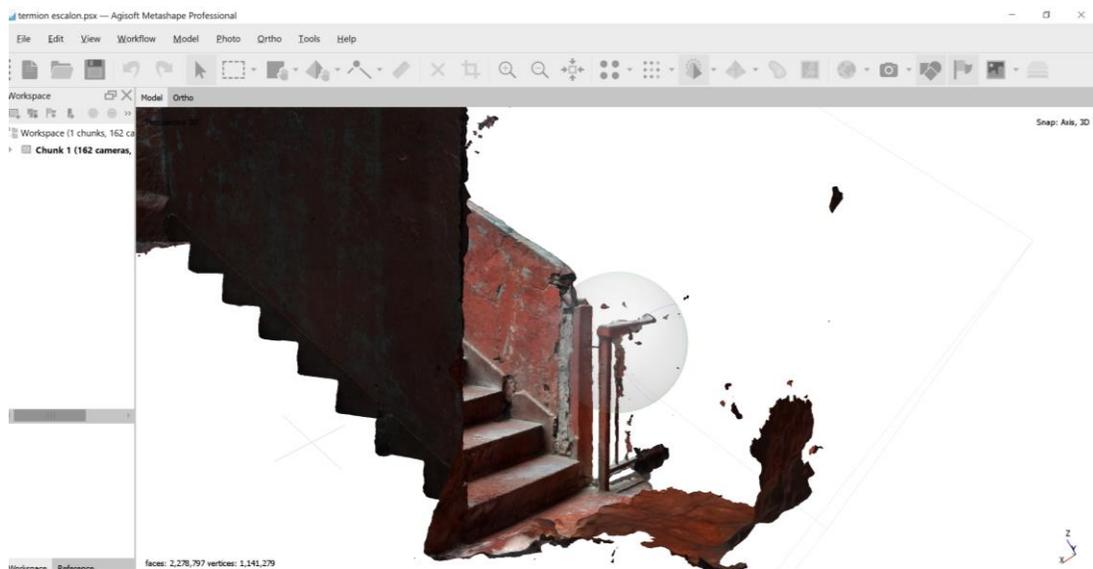


Imagen 13. Malla poligonal texturizada ya procesada en Agisoft. Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, se desarrollaron varios intentos para crear un sólido a partir de la malla generada en Agisoft. La malla poligonal generada en Agisoft era solo una superficie y no un sólido. Esta malla posteriormente fue exportada a Rhinoceros para comenzar a explorar formas de crear un volumen cerrado, que pudiese emplearse para impresión 3D. Este proceso no se culminó con éxito, por lo que se buscó ayuda mediante entrevistas con profesoras expertos en modelamiento 3D e impresión 3D.

3.5. Visitas técnicas

Para conocer de primera fuente cómo funciona una impresora 3D con hormigón se completaron 2 visitas técnicas, la primera al centro CYTED de la Universidad del Bío Bío en Concepción y la segunda a la oficina de arquitectura y diseño gt2P, donde el profesor y arquitecto Sebastián Rozas, académico de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Chile, es uno de los socios fundadores.

3.5.1. Visita técnica a la Universidad del Bío Bío

Se realizó un viaje de 3 días a la Universidad del Bío Bío, Concepción, para ver in situ cómo opera y se imprime un modelo 3D en hormigón. Además, se realizó un workshop para familiarizarse con el uso del Plugin KUKA prc y la preparación del código para el robot KUKA.

También participamos del proceso de preparación y alimentación de la mezcla de hormigón de alimenta la bomba del brazo robótico. El proceso se puede resumir de la siguiente manera: en primer lugar, luego de que el operador del robot reciba el código para la pieza que se imprimirá, este debe hacer aproximadamente 5 pruebas de testear el código, se hace que el robot ejecute la rutina completa sin la bomba de hormigón, esto para asegurarse que el código viene sin errores, que las piezas no chocarán entre si, y asegurarse de que el robot pueda concretar todos los movimientos requeridos para hormigonar la pieza que en particular se le está pidiendo.

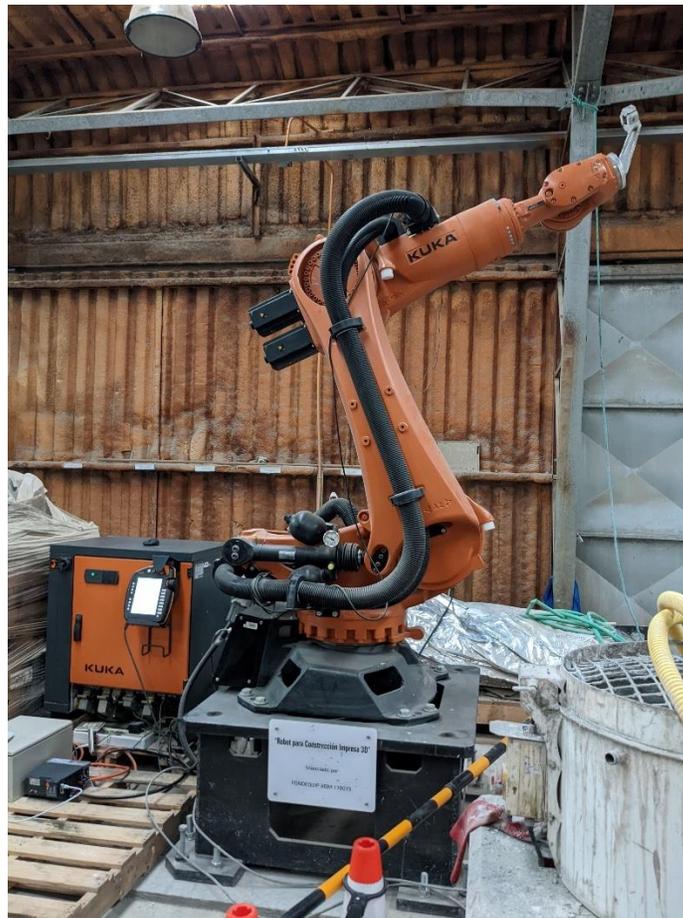


Imagen 14. Kuka. Fuente: Pedro Soza.

En paralelo, se comienza la creación de la mezcla, la cual ha sido definida según la cantidad de porcentajes que requiere de arena fina, arena gruesa, cemento, cal, aditivos y agua, anotados todos en una planilla de cálculo.

En este punto se pueden ver también algunas desventajas que posee esta tecnología, la rapidez con la que se tiene que crear la mezcla, debido a que esta se endurece rápidamente, por lo que fácilmente tapa la manguera de bombeo, y los problemas que pueden existir de hardware y software. En la visita técnica, al momento de probar un código para imprimir una pieza, el robot detuvo su accionar y la impresión no pudo llegar correctamente a su fin.

3.5.2. Visita oficina de gt2P, Arquitecto Sebastián Rozas

En segundo lugar, y a una escala mas pequeña, se concretó la visita a la oficina gt2P, con el Arquitecto Sebastián Rozas, donde se pudo ver la experimentación que existe detrás de la creación de piezas y diseños nuevos con impresión 3D, ya sea en impresoras que imprimen con filamento PLA, hormigón o arcilla. Aquí también se pudo ver otras problemáticas que posee la impresión 3D, el problema que generan las burbujas que quedan dentro de la mezcla y el problema de que al momento se imprimir son mecanismos diferentes, por un lado esta el la boquilla que se mueve a través de ejes con respecto a un código de coordenadas y por otro lado la bomba que alimenta que extrusor, que solo se dedica a extruir el material, sin ser capaz de retraerlo, para detenerse o para ir de un lugar a otro en el preso de impresión sin expulsar el material, debido a esto se generan problemas al momento de imprimir, los cuales deben ir siendo solucionados en la marcha y a través de experimentación. A modo de ejemplo en el caso de la impresora que se tenía de arcilla, al extrusor se le tuvo que agregar una pieza que, al terminar el recorrido de impresión, inmediatamente tape el extrusor, para que se detenga la salida de material y este no estropee la pieza.

3.6. Creación de maquetas de prueba

Para comprobar, a nivel conceptual, la factibilidad de la creación de piezas y su posterior unión a la estructura inicial se crearon 3 maquetas, con el fin de poder analizar en cada caso como irían las amarras y enfierraduras, así como el tamaño de las piezas con respecto a su sección. Este ejercicio sirve también para hacer una cubicación aproximada del material para imprimir las piezas en una impresora 3D de hormigón como el robot KUKA usado en el centro CYTEC cd la Universidad del Bío Bío.



Imagen 15. Caso 1
Fuente: Elaboración propia.

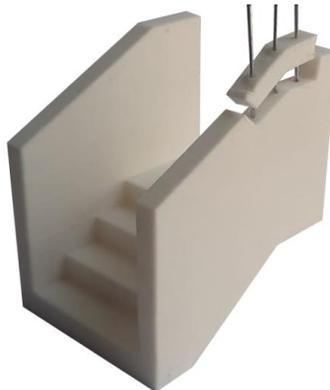


Imagen 16. Caso 2.
Fuente: Elaboración propia.



Imagen 17. Caso 3
Fuente: Elaboración propia.

3.7. Modelación del flujo de trabajo

Para completar el flujo de trabajo, en primera instancia se propuso la creación del molde negativo al sólido generado a partir de la malla exportada por el proceso de fotogrametría y por otro lado existía el interrogativo como iba a ser la mezcla que se considerase dentro del flujo de trabajo, teniendo en consideración que este debería de poseer enfierradura y esto es un problema aun dentro de la tecnología de la impresión 3D.

En este punto se concretaron tres diferentes reuniones para resolver estas dudas, por un lado, con el profesor Mauricio Loyola, para analizar la solución final de como la pieza impresa en 3D se podría anclar a la estructura dañada posterior a su regularización, y definir lesiones mecánicas autosoportantes, o sea, que no fuesen lesiones estructurales. Esto debido a la complejidad que requeriría la reparación de piezas estructurales. Por otro lado, se llegó a la decisión de considerar la

pieza hecha con filamentos que funcionaran dentro de la mezcla a modo de enfierradura, y anclar la pieza a través de enfierraduras que irían unidas a la estructura dañada y a la pieza creada previamente con perforaciones para esta pueda encajarse y unirse con mortero aditivo.

Por otro lado, se converso con la profesora Verónica Veas para revisar el proceso de reparación de elementos en hormigón armado, así como el procedimiento previo a la reparación. Finalmente, con la profesora Paula Ulloa, se estudiaron alternativas para generar una solución final al modelamiento de la pieza de vaciado, o molde negativo y completar así el proceso de trabajo de inicio a fin, propuesto en esta investigación. Como decisión final se tomó que, para completar el diseño de la pieza, se debe modelar la pieza faltante de la lesión sobre la malla creada en el software de fotogrametría.

4. Resultados

A continuación, se presenta el resultado de este trabajo, sintetizado en un diagrama de flujo que retrata la metodología desarrollada para capturar y resolver lesiones mecánicas en construcciones de hormigón armado y repararlas usando impresión 3D. A continuación, se explicará cada etapa y como esta se desarrolla dentro del flujo de trabajo.

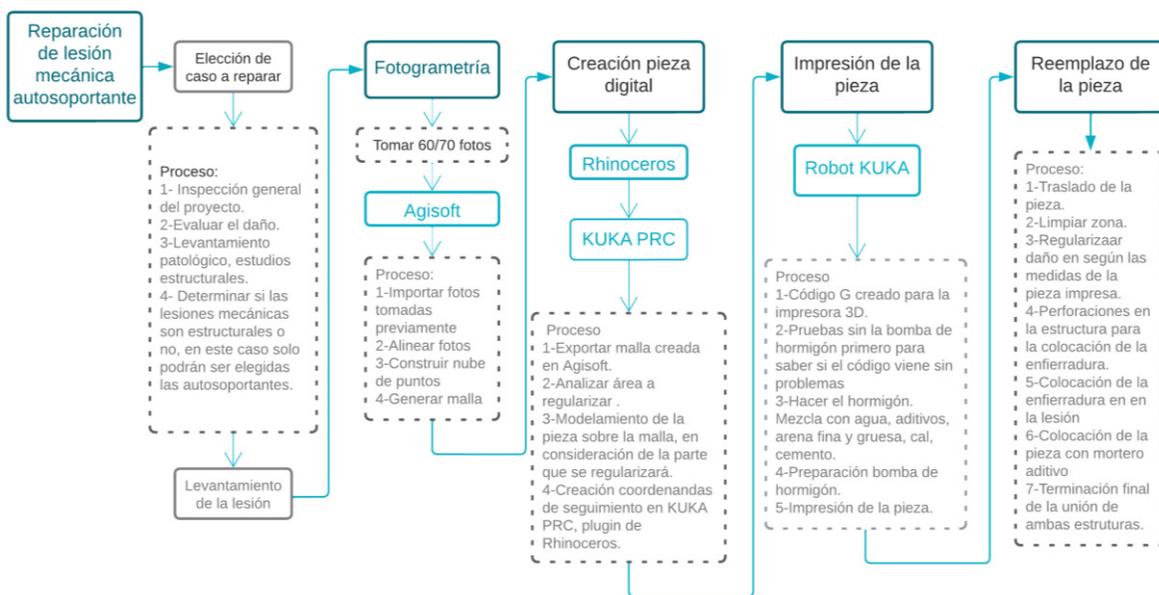


Imagen 18. Flujo de trabajo. Fuente: Elaboración propia.

Dentro del flujo de trabajo se contemplaron 5 pasos importantes:

4.1. Selección caso a reparar

Tras elegir un caso con las problemáticas de hormigón armado, con lesiones mecánicas autosoportantes en hormigón armado, comienza la primera fase de evaluación, la cual consta de cuatro pasos: inspección general del proyecto, evaluación del daño, levantamiento patológico, y estudios estructurales determinando si las lesiones son estructurales o no.

4.2. Desarrollo fotogrametrías

Posteriormente, para completar la evaluación del caso a reparar se deben completar el levantamiento fotogramétrico de las lesiones seleccionadas. Para esto, en terreno, se debe colocar una marca que indique medidas. En este estudio se utilizó una cinta de papel con medidas cada 10 cm. Esto se realiza para posteriormente escalar la fotogrametría.

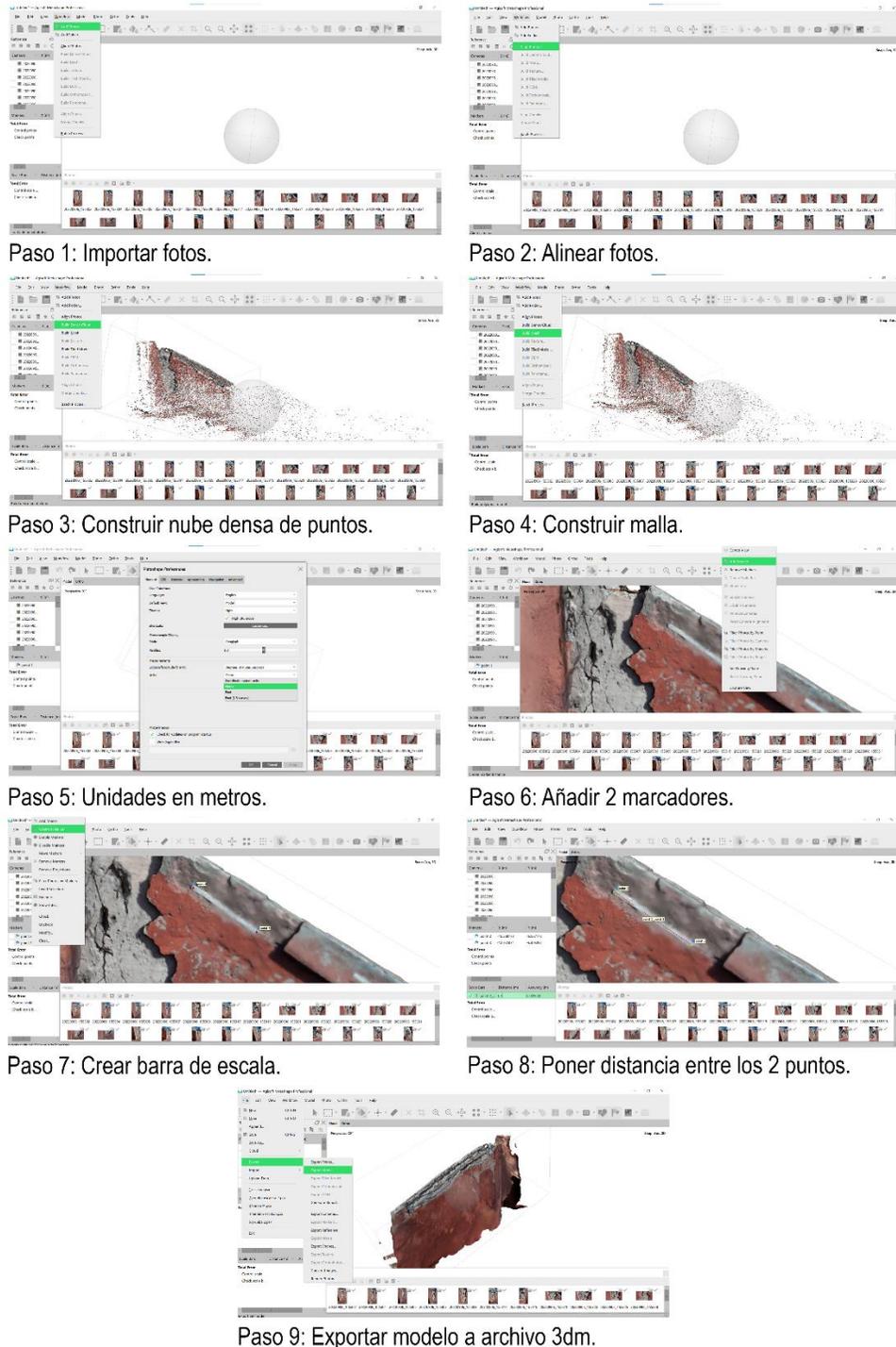


Imagen 19. Proceso fotogrametría. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede ver en la imagen 19, el proceso de construcción de las fotogrametrías consta de 9 pasos. En primer lugar, se deben importar las fotos previamente tomadas en terreno. En segundo lugar, se deben alinear las fotos. En tercer lugar, se debe construir una nube densa de puntos. En cuarto lugar, se crea la malla poligonal. Si bien tras ejecutar este proceso la malla poligonal ya está cerrada, ella no tiene escala ni medida alguna, es por esto que el paso 5 se ajustan las unidades de medida en metros, para posteriormente en el paso 6 añadir dos marcadores y con ellos se crea una barra de escala en el paso 7. En octavo lugar, se añade la distancia que existe en la realidad entre las líneas dentro del marcador. Finalmente, en noveno lugar, se debe exportar la malla a un archivo 3dm para que sea posible abrir en Rhinoceros.

4.3. Creación de la pieza

Tras haber creado la malla poligonal en Agisoft, esta se exporta a Rhinoceros. En el modelo poligonal se debe analizar área a regularizar. Posteriormente, se debe hacer el modelamiento de la pieza sobre la malla, en consideración de la parte que se regularizará. Para que la pieza se conecte a la estructura se deben incluir perforaciones en la pieza a imprimir, las que después también deberán hacerse en el área a reparar para asegurar la unión final. Finalmente, con el plugin KUKAprc se debe crear la rutina de coordenadas de impresión que seguirá el robot de impresión.

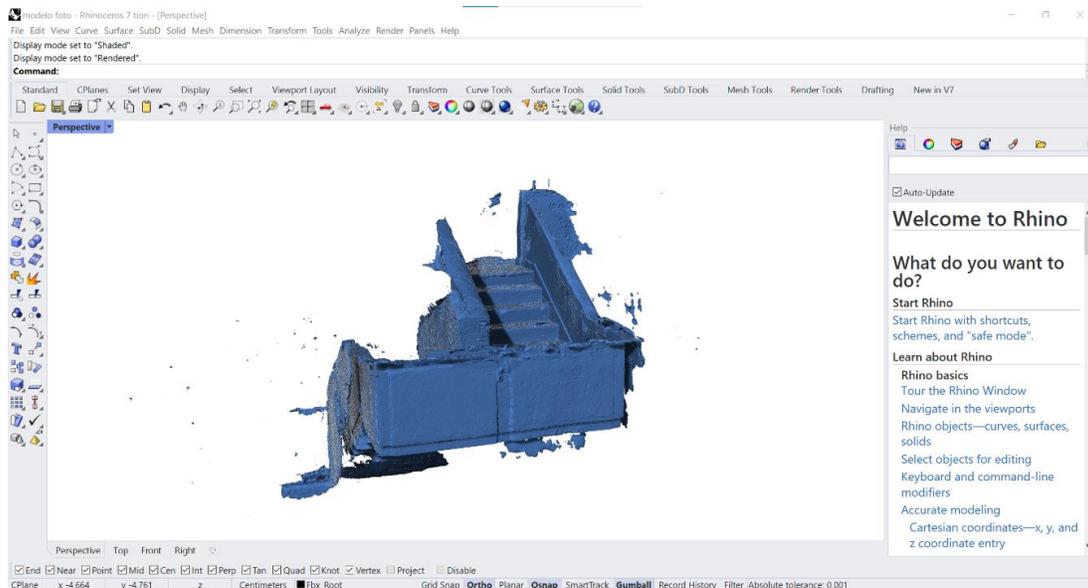


Imagen 20. Modelado de la pieza. Fuente: Elaboración propia.

4.4. Impresión de la pieza.

Con el modelo 3D se genera el código de impresión, y con este código se procede a la impresión de la pieza.

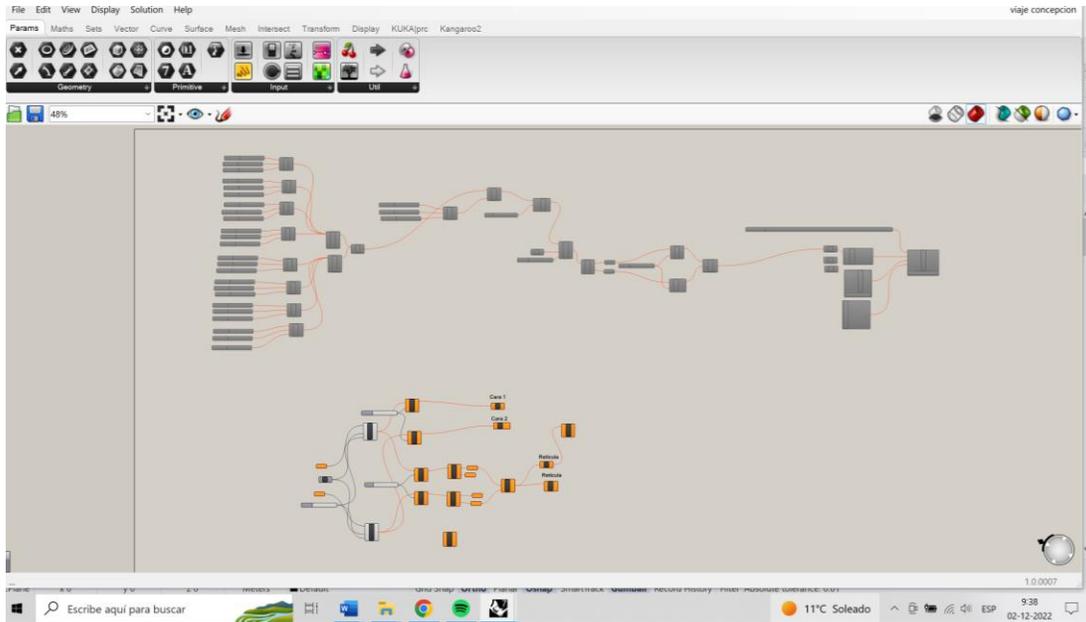


Imagen 21. Ejemplo de trabajo en Grasshopper creado en viaje a Concepción. Fuente: elaboración propia.

Para confirmar que el código no tenga fallas, errores o tenga movimientos que el robot no pueda completar se deben hacer una serie de pruebas sin la bomba de hormigón conectada. Esto a través de un operador que controla robot a través de un comando como el de la imagen 22.

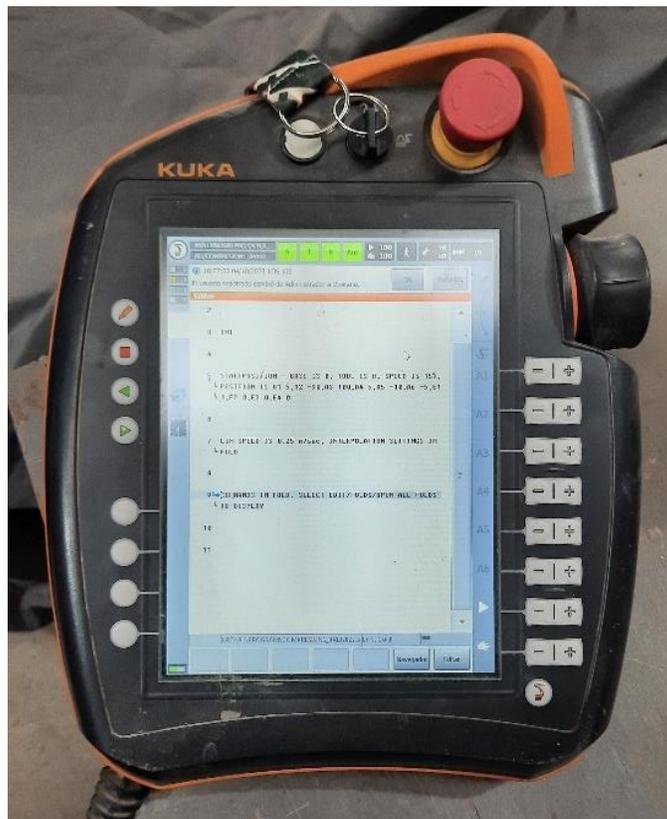


Imagen 22. Comando KUKA. Fuente: elaboración propia.

En paralelo a este proceso, se hace la mezcla de hormigón, que lleva agua, aditivos, arena fina, arena gruesa, cal, cemento. Luego esta mezcla se debe introducir a la bomba de hormigón, que mediante una manguera extruirá el material a presión.



Imagen 23. Bomba hormigón. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, la bomba se conecta al brazo robótico y a la boquilla de impresión adosada al cabezal del brazo, para que este puede comenzar a imprimir la pieza.

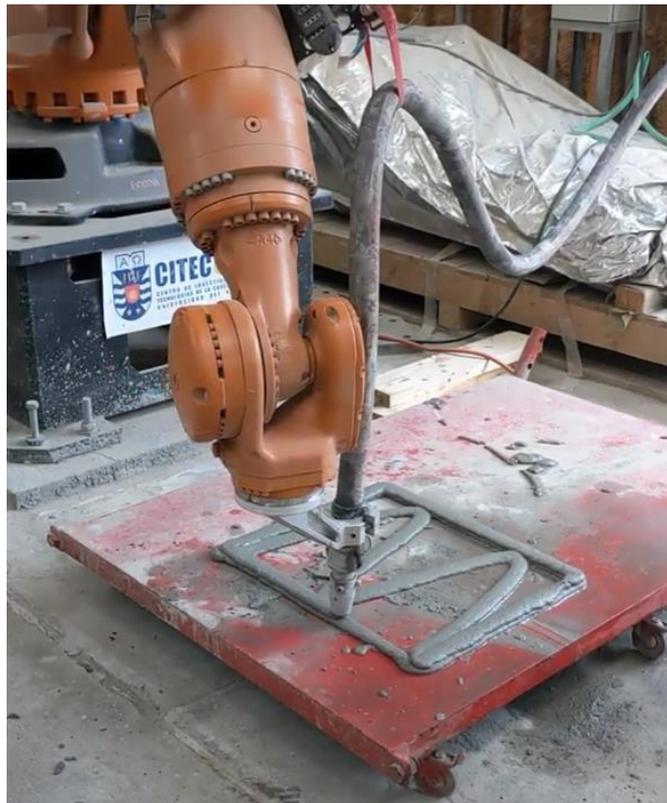


Imagen 24. Impresión en proceso. Fuente: Elaboración propia.

4.5. Reemplazo de la pieza

Para completar la reparación, se debe limpiar la zona a reparar, regularizar el daño en base a la pieza creada previamente, perforar la zona para la posterior colocación de las enfierraduras, traslado de la pieza impresa al lugar de la reparación, colocación de la enfierradura, colocación de la pieza con mortero aditivo y finalmente la terminación final uniendo ambas estructuras para que trabajen de manera conjunta.

A modo de discusión de resultados, en primera instancia existieron diversas problemáticas a lo largo del desarrollo de este estudio. En primer lugar, se tomó como decisión analizar 1 caso con 3 lesiones diferentes dentro del mismo edificio. Esto fue beneficioso debido a que se hizo el levantamiento fotográfico dentro del mismo proyecto, lo que facilitó la rapidez de la toma de imágenes y la evaluación de las lesiones.

En cuanto a la fotogrametría no estuvo considerado más de 1 visita para la toma de fotos, pero debido a la falta de información de fotos, se tuvo que concretar una segunda visita de toma de fotos, atrasando el proceso de trabajo. La situación más compleja en el total del flujo de trabajo fue el cierre de la malla, ya que en un principio se buscó crear un objeto "sólido" en Rhinoceros. Ello fue descartado tras reuniones con profesores expertos, debido a la complejidad y densidad que posee la malla exportada desde Agisoft. Por ello finalmente se tomó la decisión de modelar sobre dicha malla la pieza a reparar.

En cuanto a oportunidades a futuro, se puede considerar la creación de plantillas al momento de modelar la pieza en Rhinoceros, o sea, regularizar el daño en primera instancia en el proceso de modelado 3D, para posteriormente en terreno constatar con certeza la situación empleando, por ejemplo, una plantilla para cortar y regularizar la lesión. Por otro lado, también se puede considerar la creación de un catálogo de lesiones para la posterior agilización de lesiones similares.

Por otro lado, debido a que el robot no puede imprimir dos piezas por separado, debido a que la bomba no es capaz de reabsorber material, en un futuro se vislumbra que con este problema solucionado podría agilizarse el flujo de trabajo imprimiendo varias piezas al mismo tiempo, pero aun así cuidando siempre la capacidad máxima de mezcla que puede contener la bomba de inyección de material. Otra oportunidad de desarrollo es la investigación y experimentación con distintos tipos de boquillas a utilizar al momento de imprimir la pieza, ya que estas determinan las medidas que posee el cordón impreso. Por ejemplo, el robot KUKA usado en la Universidad del Bío Bío extruye un cordón de 1cm por 4cm, lo cual delimita la precisión posible de alcanzar. Con una boquilla más pequeña las medidas del cordón extruido serían diferentes.

Finalmente, no se puede obviar que un problema presentado fue la falta de conocimientos avanzados de técnicas de modelamiento con Rhinoceros, o alguna otra herramienta de modelación 3D, para lograr generar un molde negativo de la malla, lo cual, de poder concretarse en un futuro, entregaría más fidelidad a la pieza creada y exactitud al modelo de flujo de trabajo propuesto.

5. Conclusiones

En conclusión, luego de haber analizado exhaustivamente la lógica secuencial necesaria para la elaboración de un flujo de trabajo para impresión de elementos y piezas en 3D, destinadas a la reparación de lesiones mecánicas existentes en edificios, y basado en el uso intensivo de herramientas digitales como Agisoft, Rhinoceros, Grasshopper y KUKA prc, y robot de impresión en hormigón 3D, se puede afirmar que es factible generar un flujo de trabajo que relacione las tecnologías mencionadas anteriormente.

El desarrollo de esta investigación permite adquirir conocimiento sobre el proceso de creación de fotogrametrías y como usar estas dentro de un flujo de reparación, para evaluación de lesiones y levantamiento casos de estudio, también se crearon y exportaron mallas poligonales desde Agisoft a Rhinoceros, resolviendo los problemas que aparecieron en este proceso, y encontrando una solución para la creación de la pieza final, la cual fue modelar sobre la malla poligonal, usándola de referencia. También se logró completar y comprender el flujo de trabajo que posee la etapa de la impresión 3D. Al respecto, las visitas técnicas fueron fundamentales para comprender el uso de todas las herramientas digitales que demandó la creación de la propuesta del flujo de trabajo.

Por otro lado, se detectan posibles mejoras al modelo del flujo de trabajo propuesto, desde la agilización de la creación de piezas, logrando sacar la pieza en negativo de la malla exacta, la creación de plantillas en base a la regularización de la malla poligonal, hecha previamente en el modelo 3D, el mejoramiento tecnológico de la capacidad de la impresora 3D de hormigón de imprimir más de 1 pieza con miras a agilizar tiempos, y la experimentación de tamaños de boquillas y cordones. Todo esto podría conllevar a futuros caminos vinculados a esta investigación con miras a optimizar el flujo de trabajo propuesto, mejorado cada etapa a la luz de sus desafíos respectivos.

Finalmente, se considera una contribución inicial la utilización de estas tecnologías para la reparación de lesiones mecánicas autosoportantes dentro de viviendas sociales de hormigón armado, ya que como se mencionó a lo largo de la investigación, no se encuentra gran información de piezas por separado impresas que hayan sido utilizadas para la reparación de edificaciones existentes, siendo esta una gran oportunidad dentro del área de desarrollo tecnológico, una oportunidad para seguir investigando como este proceso, apenas aquí esbozado, podría enriquecerse con la exploración de más líneas de trabajo.

Agradecimientos

Agradezco especialmente a los profesores de la escuela que me apoyaron durante este proceso, Verónica Veas, Mauricio Loyola y Camilo Guerrero. Por otro lado, a la profesora Paula Ulloa y al estudiante Tomas Acuña Vásquez de la Universidad del Bío Bío por su apoyo durante el viaje y consultas.

Finalmente, a la Universidad del Bío Bío, por abrir sus puertas al centro CYTED.

Referencias

Al Jassmi H, N. F. (2018). *Large-Scale 3D Printing: The Way Forward*.

- Architecture, A. f. (2022). *Association fot Robots in Architecture*. Obtenido de <https://www.robotsinarchitecture.org/kuka-prc>
- Broto, E. d. (2005). *Enciclopedia Broto de patologías de la construcción*. .
- CASEN. (2019). *Región Metropolitana de Santiago encuesta CASEN 2017: Resultados vivienda y entorno Seremi de Desarrollo Social Metropolitano*.
- CChC. (2019). *Balance de Vivienda y Entorno Urbano*.
- CChC. (2019). *Balance de Vivienda y Entorno Urbano Anexo 2*.
- CChC. (2022). *CCHC REALIZÓ PRIMER ENCUENTRO NACIONAL DS27-DS255 EN TEMUCO CON FOCO EN MEJORAR EL DÉFICIT CUALITATIVO DE VIVIENDAS*. Obtenido de <https://cchc.cl/comunicaciones/noticias/cchc-realizo-primer-encuentro-nacional-ds27-ds255-en-temuco-con-foco-en-mejorar-el-deficit-cualitativo-de-viviendas>
- García-Alvarado, R. (2021). *'Architectural Evaluation of 3D-Printed Buildings'* .
- Teizer, J A. B. (2016). *Large Scale 3D Printing of Complex Geometric Shapes in*.
- KUKA. (2022). *KUKA 120 R2500 pro*. Obtenido de www.kuka.com
- Bresegheol L. R. N. (2022). *Enhanced Design and Process Control for Robotic 3D Concrete Printing*.
- Metashape. (2021). <https://www.agisoft.com/>.
- MINVU. (2018). *Manual de Reparaciones y Refuerzos Estructurales*.
- Peng Wu, J. W. (2016). *A critical review of the use of 3-D printing in the construction*.
- Shakor, P. S. N. (2019). *A Study into the Effect of Different Nozzles Shapes and Fibre-Reinforcement in 3D Printed Mortar*.
- Rhinoceros. (2022). *rhino3d*. Obtenido de <https://www.rhino3d.com/es/features/>
- García-Alvarado, R. G. M.-O.-P. (2021). *Architectural Evaluation of 3D-Printed Buildings*.
- S&p. (2019). *Patologías en edificaciones: cuáles son las más frecuentes y cómo se originan*. Obtenido de <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/patologias-edificaciones/>
- Doyle, S. E. L. (2019). *Dissolvable 3D printed formwork*.
- Shirowzhan, F. T. (2020). *Criteria development for sustainable construction manufacturing in Construction Industry 4.0: Theoretical and laboratory investigations*.
- TECHO. (2021). *Catastro Nacional de Campamentos 2020-2021 INFORME EJECUTIVO*.
- Fundación Vivienda. (2018). *Déficit Habitacional cuantitativo*.
- Yuhong, L. F. (2014). *Study on the Status Quo and Problems of 3D Printed Buildings in*.

