DISEÑO PARAMÉTRICO Y FABRICACIÓN DIGITAL PARA LA PRODUCCIÓN DE PREFABRICADOS ARQUITECTÓNICOS DE CONCRETO

José Luis Encarnación Miranda [1], Juan Gerardo Oliva Salinas, Ronan Bolaños Linares, Juan Carlos Romero Soto, Andrés Vázquez Montesinos, Enrique Hernández Díaz.

[1] Facultad de Arquitectura. Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM.
Ciudad Universitaria, Ciudad de México, C.P. 04510, México
jlemiranda@comunidad.unam.mx

Resumen

Este documento forma parte de un proyecto de investigación que aplica el uso de herramientas digitales y algoritmos de diseño paramétrico combinados con técnicas de fabricación digital las cuales fueron implementadas en procesos convencionales de diseño y fabricación de elementos prefabricados de concreto arquitectónico.

Como ejercicios de experimentación se construirán:

a) Un pabellón modular prefabricado de doble curvatura de concreto reforzado con fibra de vidrio (GFRC) con espesores que van de los 2.5 cm a los 4 cm aprovechando las características físicas de color y textura que brindan los prefabricados arquitectónicos.

b) Diseño y fabricación de módulos prefabricados para fachada: 3 propuestas de paneles prefabricados tipo celosía de concreto arquitectónico en espesores de 2.5 a 3 cm, proponiendo distintos tipos de concreto de alto comportamiento con diferentes características como: alta resistencia, propiedades fotocatalíticas, propiedades térmicas y acústicas, color y textura.

La propuesta plantea la integración de las técnicas digitales combinadas con la experiencia de la mano de obra que realiza los distintos procesos de fabricación y habilitado de moldes y modelos. En la búsqueda de soluciones que permitan la elaboración de geometrías complejas, reduciendo el tiempo de ejecución y ahorrando recursos materiales.

En la parte de diseño se proponen geometrías creadas por medio de algoritmos generativos. La intención es ejecutar un proceso de diseño paramétrico que permita modificar y adecuar los diseños de los elementos prefabricados propuestos a diferentes planos verticales de fachadas, rectos o de curvatura simple. Y la creación de geometrías complejas que se puedan fabricar con apoyo de los flujos de diseño y producción propuestos en la investigación.

Se presentan los resultados de las pruebas obtenidas y las propuestas de diseño realizadas tanto digitales como en modelos físicos de estudio a escala y los avances a la fecha de los modelos construidos en la propuesta de investigación.

Introducción

El origen del proyecto inicia con la revisión de la literatura sobre el uso de herramientas digitales y sus aplicaciones actuales en diferentes campos de conocimiento y disciplinas. Constando que, en los últimos años la integración de herramientas digitales ha tomado protagonismo de forma importante en diversos procesos de diseño en disciplinas como: arquitectura, diseño industrial, urbanismo, diseño del paisaje, entre otros. Esta amplia variedad de aplicaciones también está ligada a la diversidad de softwares y flujos de trabajo utilizados en los procesos de diseño mencionados, así como también, la interoperabilidad de softwares.

La intención del proyecto es combinar las herramientas digitales con las técnicas de prefabricación arquitectónica incluyendo la gran experiencia de la mano de obra. En la búsqueda de soluciones más eficientes, brindando a los trabajadores ventajas en el proceso de fabricación, pero sin desplazar sus habilidades y conocimientos en el proceso de producción. De tal forma que se puedan reducir la cantidad de materiales para fabricación, reducir los tiempos de producción, diseñar elementos más ligeros, más esbeltos, pero a la vez más resistentes a los esfuerzos a los que pudieran ser sometidos y elaborar geometrías complejas.

Objetivo

Una vez realizado este análisis, la investigación toma como objeto de estudio evaluar los beneficios de integrar las herramientas digitales y la fabricación digital con los procesos de diseño, elaboración de moldes y fabricación de elementos prefabricados de fachada, implementando algunas técnicas de prefabricación arquitectónica industrializada usadas en México.

Las preguntas de investigación son: ¿Cómo se podrían integrar las estrategias digitales para vincular el diseño arquitectónico, la prefabricación y construcción? ¿Es posible que el diseño asistido por computadora pueda mejorar la calidad constructiva en procesos de prefabricación ahorrando tiempos de ejecución y costos? ¿Cómo evaluar la utilidad de incorporar herramientas digitales en procesos de diseño y prefabricación? ¿Es posible integrar los procesos de fabricación digital con las técnicas de la mano de obra tradicional en búsqueda de mejorar los procedimientos de producción y prefabricación?

Con respecto a la prefabricación arquitectónica, sería muy interesante combinar las técnicas de producción y tecnologías de fabricación con las amplias posibilidades que brindan las actuales tecnologías digitales y herramientas de fabricación digital, pero además también considerar los criterios de maniobras, transporte y montaje en sitio de los elementos prefabricados.

La prospectiva a futuro del tema de investigación es cambiar la forma en que se diseñan y fabrican los elementos prefabricados arquitectónicos de concreto México.

Contenido

Como ejercicios de experimentación se construirán:

a) Un pabellón modular prefabricado de doble curvatura de concreto reforzado con fibra de vidrio (GFRC) con espesores que van de los 2.5 cm a los 4 cm aprovechando las características físicas de color y textura que brindan los prefabricados arquitectónicos.

b) 3 propuestas de paneles prefabricados tipo celosía de concreto arquitectónico en espesores de 2.5 a 3 cm, proponiendo distintos tipos de concreto de alto comportamiento con diferentes características como: alta resistencia, propiedades fotocatalíticas, propiedades térmicas y acústicas, color y textura.

Utilizando agregados minerales en la mezcla del concreto que permiten tener color y textura en la superficie de los módulos prefabricados. Y considerando los beneficios de proponer la mezcla de concreto, que nos permita tener un espesor mínimo.

Para la construcción de estos elementos se integraron en el proceso de diseño herramientas digitales y técnicas de fabricación digital combinadas con algunas técnicas de prefabricación arquitectónica industrializada utilizadas en México.

Con respecto al diseño y generación de las geometrías se utilizó el software Rhinoceros con Grasshopper y algunos plugins. Para obtener los modelos digitales; es importante mencionar que en este flujo de trabajo las geometrías se generan a partir de componentes que forman definiciones, las cuales permiten modificar las geometrías en cuanto a formas y dimensiones adecuándose paramétricamente a los valores que los componentes y las restricciones de estos contienen.

Posteriormente se continuó con la fabricación de moldes y modelos tanto digitales como a escala reducida, con la finalidad de proponer la construcción en escala real de los modelos elegidos con algunas técnicas de prefabricación arquitectónica. Elaborando moldes, modelos en madera, yeso, gfrc, látex, realizando mezclas de concreto convencionales y especiales, elaborando pruebas y ensayos de laboratorio.

La construcción de los elementos y las prácticas de laboratorio se han realizado en laboratorios de la UNAM. El Laboratorio de Arquitectura + Diseño y Tecnología Experimental · LATE. El Laboratorio de Robótica CIDI/IIMAS, el Laboratorio de Estructuras Ligeras, en Ciudad Universitaria, el Laboratorio de Análisis de Riesgos Naturales y Antropogénicos y la Unidad de Investigación Multidisciplinaria UIM en la FES ACATLÁN.

Se presenta un breve resumen del trabajo realizado, parte de la documentación de los ejercicios de experimentación y del avance de la investigación a la fecha de presentación de este artículo.

Metodología

a) Pabellón modular prefabricado

Se realizaron pruebas digitales para definir la geometría del pabellón a fabricar, teniendo como opciones pabellón simple de 3 apoyos, pabellón simple de más apoyos y pabellón con un vacío central y apoyos internos. Utilizando los software Rhinoceros y Grasshopper.

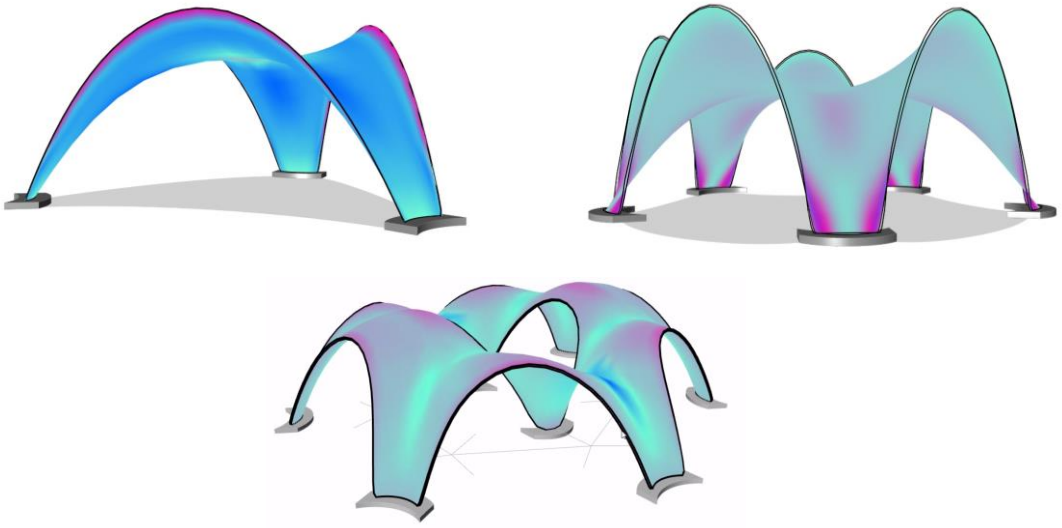

Figura 1. Modelos digitales de análisis del pabellón

En esta primera definición se programó el algoritmo para cumplir con la condición de poder modificar generativamente la cantidad de apoyos perimetrales del cascarón. Se modifican los valores de fuerza aplicados en los bordes libres. Se logró el objetivo de poder modificar los apoyos desde 3 hasta 8 valores radiales.
Para este proyecto y experimentación se delimitará el pabellón a diseño de 3 apoyos.

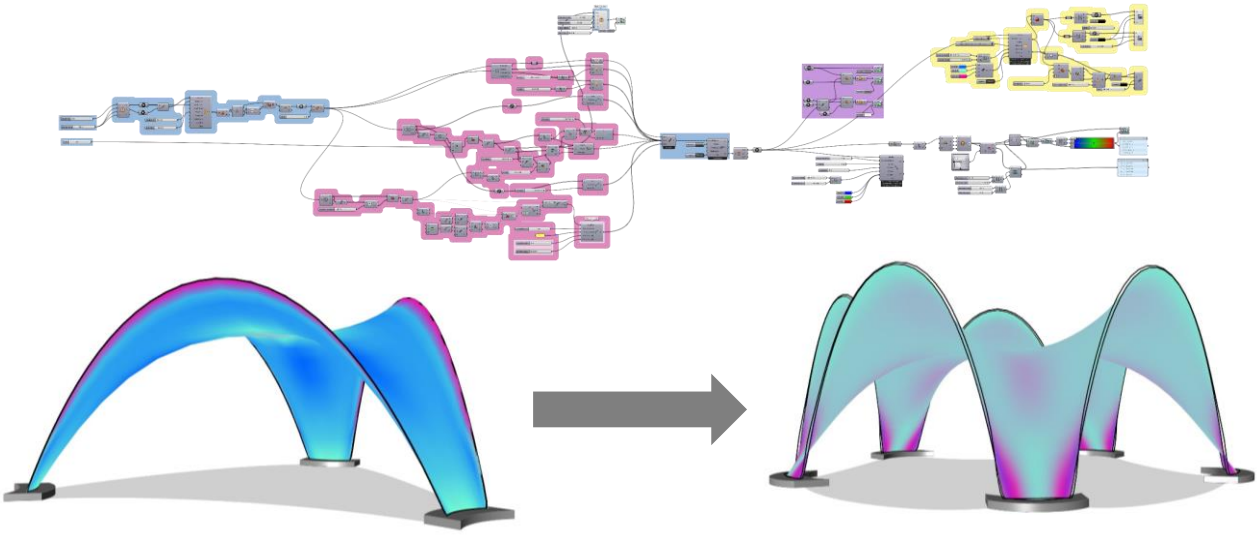

Figura 2. Definición de Grasshopper que permite la generación de las geometrías.

La modulación del pabellón corresponde a 3 secciones iguales con 3 segmentos cada una para tener 9 piezas y 3 moldes diferentes para realizar el vaciado en GFRC de los módulos del pabellón. La dimensión aproximada del pabellón en planta está propuesta entre los 5 x 5 metros considerando una sección cuadrangular. Adicionalmente se analizó estructuralmente la geometría elegida.

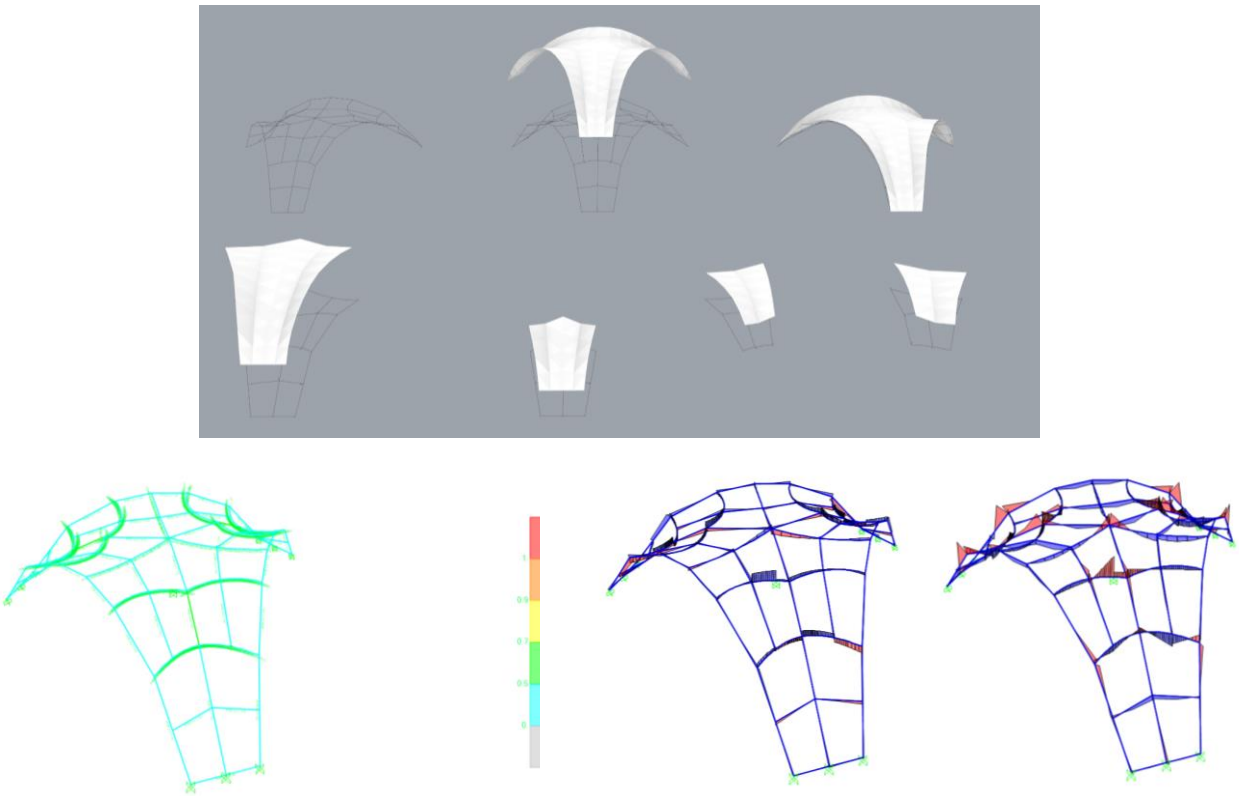

Figura 3. Propuesta de modulación

Para visualizar la geometría del pabellón y proponer el procedimiento de fabricación se realizó la impresión 3d a escala de la propuesta usando filamento PLA de ácido poliláctico, este modelo físico permitió proponer el proceso de elaboración del molde para vaciado de los segmentos del pabellón

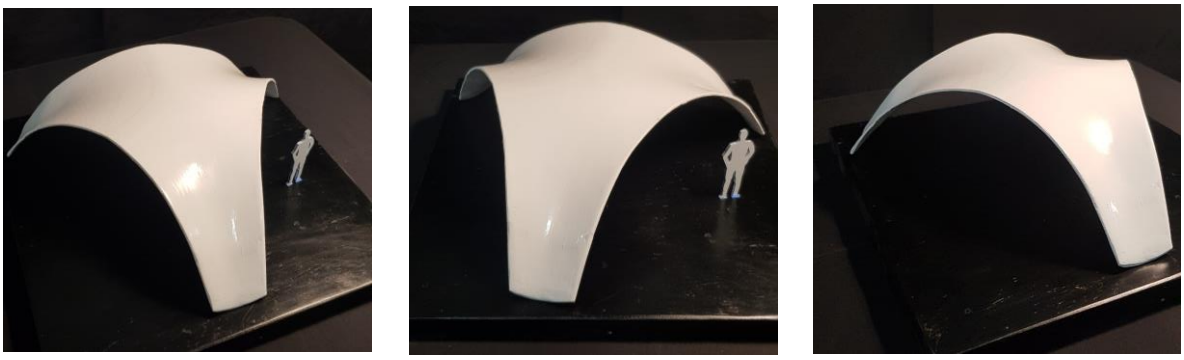

Figura 4. Modelo a escala en impresión 3d

Se diseñó digitalmente la propuesta de moldes para vaciado de los segmentos y realizado el corte láser a escala de las secciones para ensamblar los moldes, que permitirían obtener las superficies de doble curvatura propuestas para esta geometría, también se ha preparado la superficie de los moldes para realizar el colado de unas muestras a escala del pabellón.

Figura 5. Modelo a escala de moldes para vaciado de los módulos del pabellón

Se realizó el corte del triplay con CNC de las secciones de los moldes, se ensamblaron y se prepararon las superficies y bordes para realizar el vaciado de los segmentos del pabellón, en este procedimiento se pudo comprobar que el diseño digital de los moldes permite tener precisión y reducir los tiempos de habilitado y ensamble de moldes de geometrías complejas o como es el caso de doble curvatura. A la fecha se encuentra pendiente el vaciado de los segmentos del pabellón.

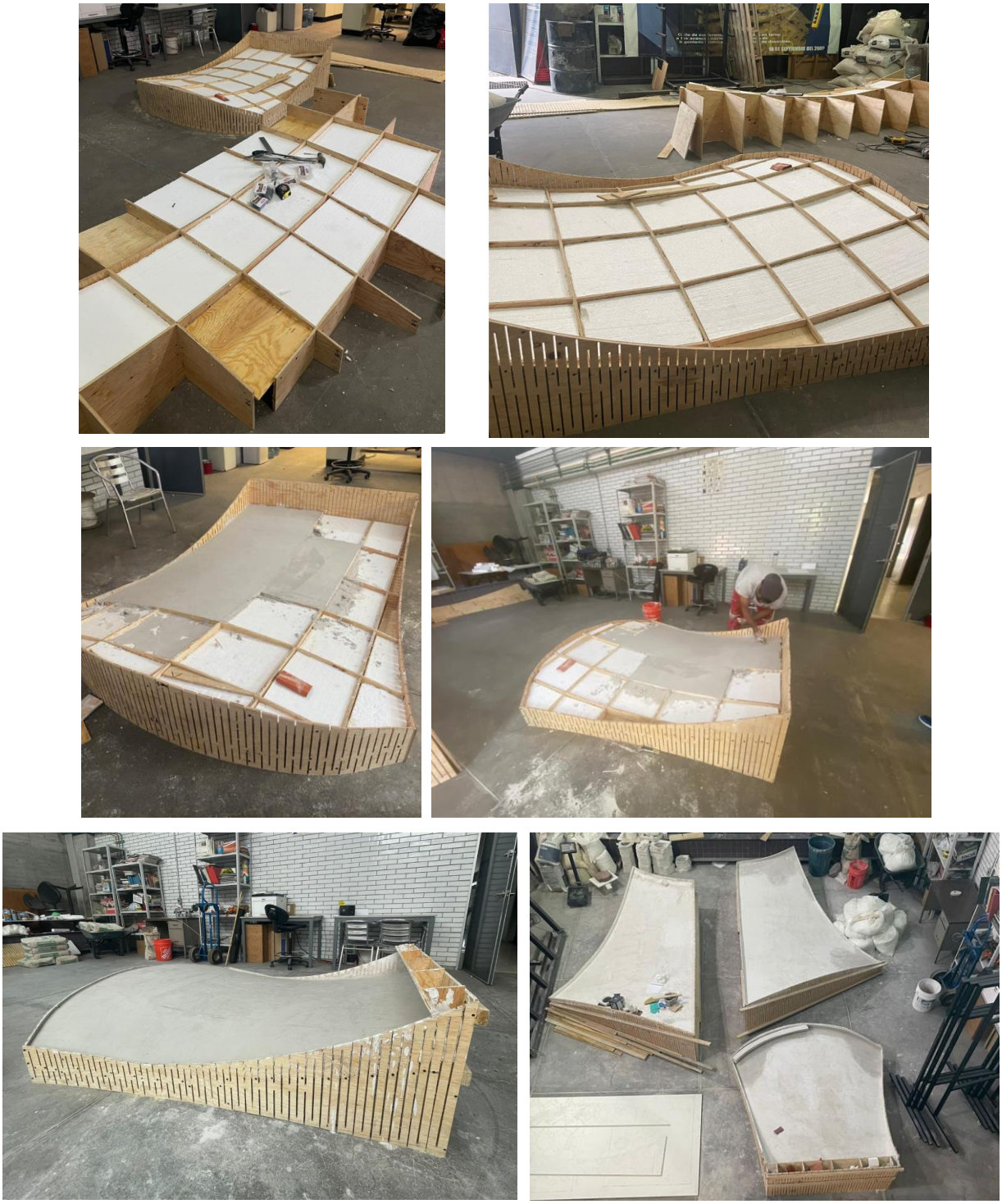

Figura 6. Moldes en escala 1 a 1 para realizar el vaciado de los segmentos del pabellón

b) Diseño y fabricación de módulos prefabricados para fachada tipo celosía

Se han diseñado algunas propuestas digitales usando herramientas de diseño computacional en Grasshopper como con interfaz entre Rhinoceros y algunos plugins. Se seleccionaron 3 modelos para construcción.

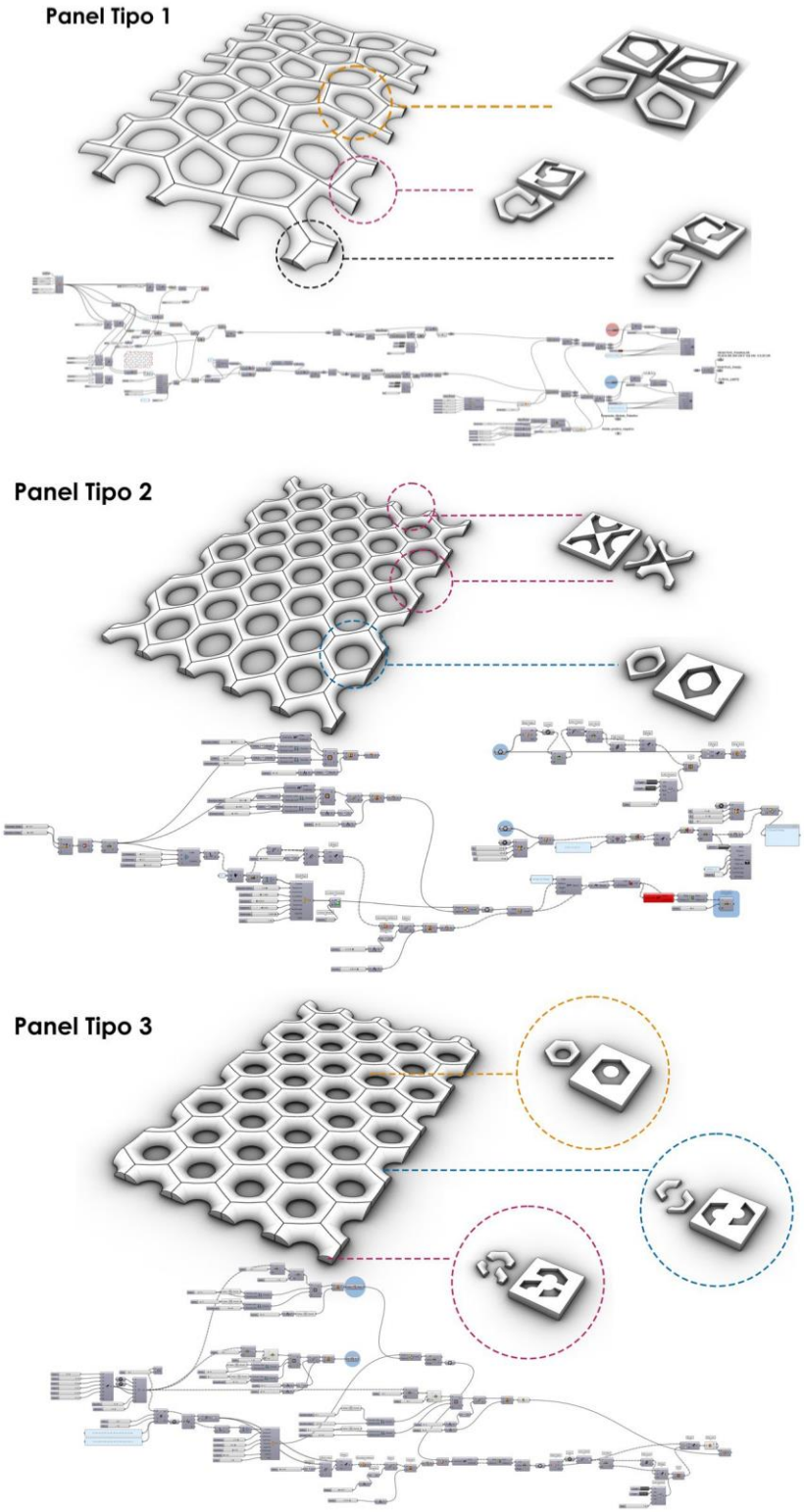

Figura 7. Paneles tipo celosías y definición para generación de las geometrías

Se hizo el fresado en foaumular los moldes negativos de celosía de fachada, con el brazo robótico del Laboratorio de Arquitectura + Diseño y Tecnología Experimental (LATE) de la UNAM. Generando la programación del algoritmo para las rutas del brazo robótico. También se realizó impresión 3d de los módulos en positivo de los elementos.

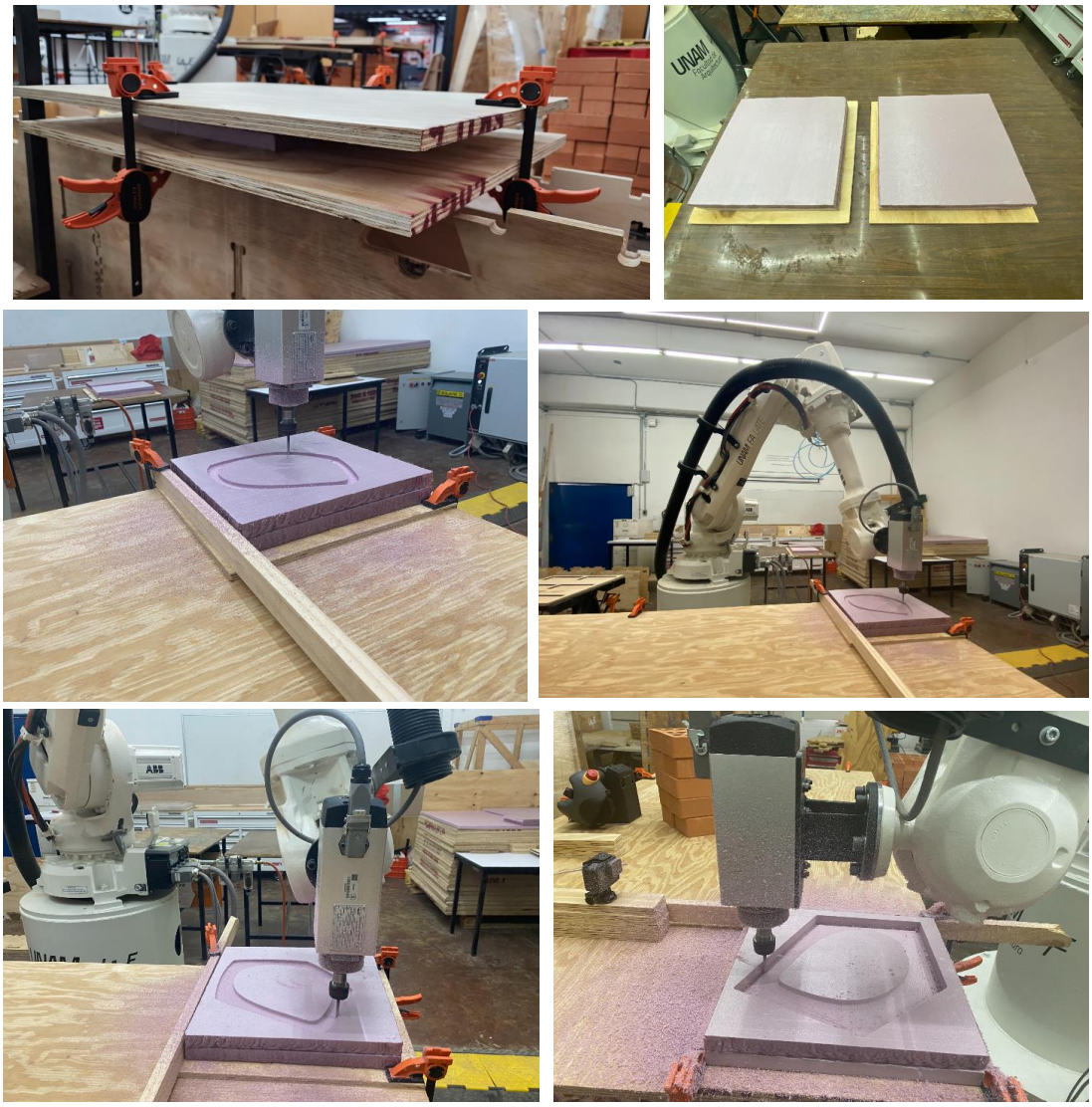

Figura 8. Fresado de moldes negativos con brazo robótico.

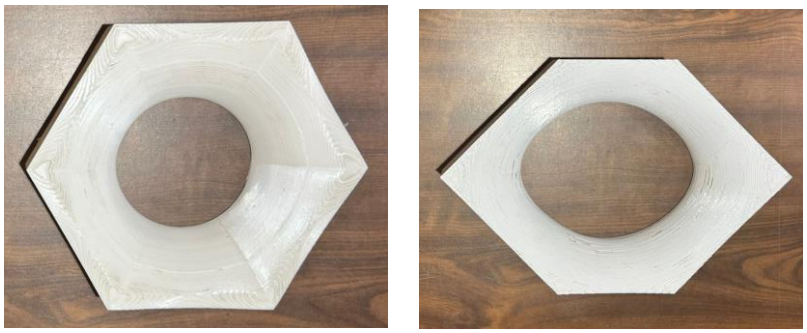

Figura 9. Modelos positivos en impresión 3d

Se continuó con el colado látex de los elementos positivos de yeso obtenidos del molde en foamular y de las piezas de impresión 3d, con este molde de látex negativo se obtuvieron varios elementos en positivo para poder realizar el molde positivo de las celosías en yeso para posteriormente colar en GFRC un molde negativo que servirá para obtener los paneles de celosías propuestos.

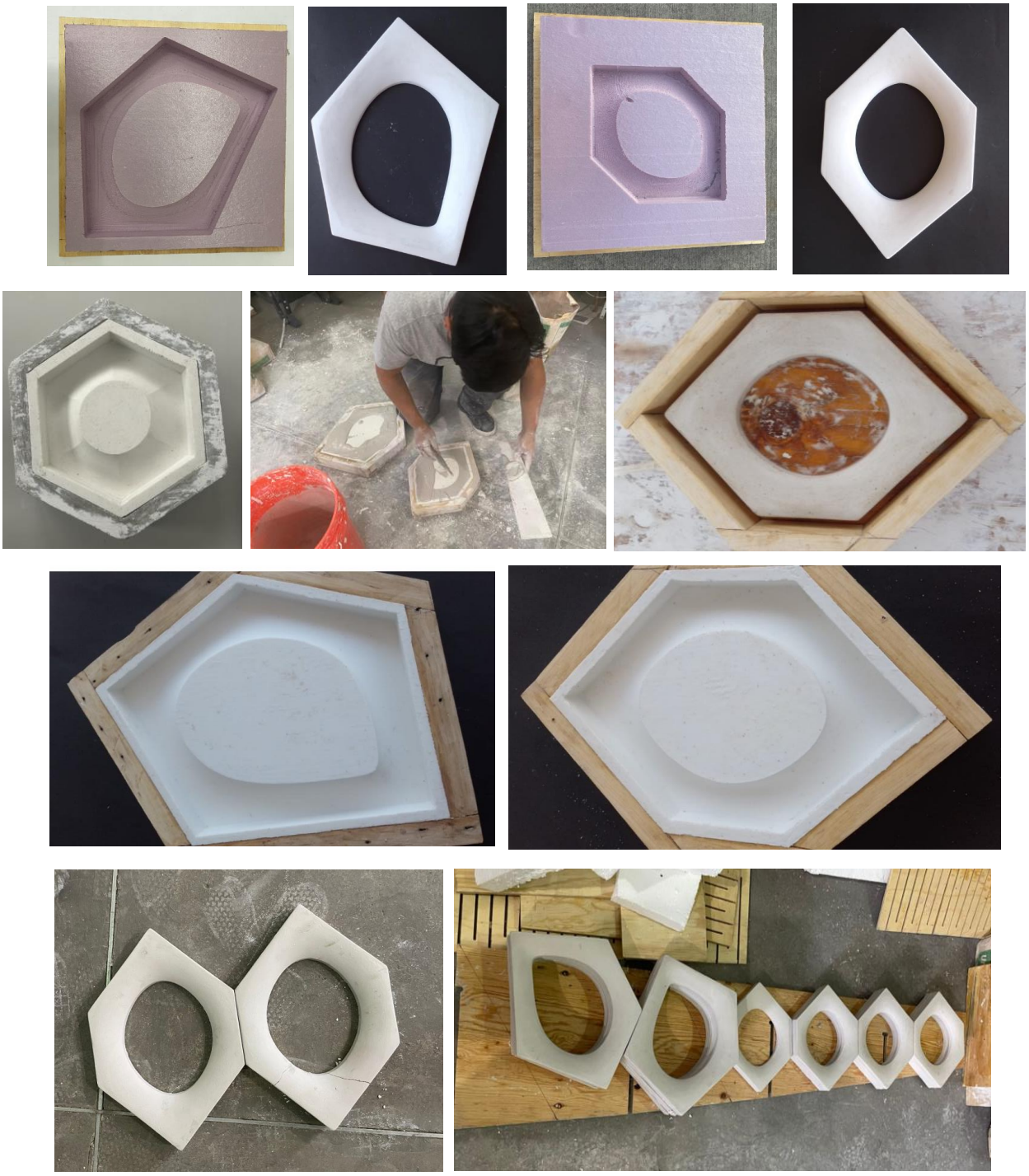

Figura 10. Moldes negativos y modelos positivos para elaborar molde para vaciado de celosías

Posteriormente se continuó con el armado y habilitado del modelo positivo con las secciones obtenidas de los moldes de látex, teniendo las piezas y dimensiones requeridas e indicadas en la definición del código de Grasshopper y el modelo digital. Se realizó el vaciado del molde con GFRC premix, usando un bastidor de perfil tubular, una vez fraguado el elemento se desmoldo y retiro el yeso para obtener los moldes negativos patrón con los que se podrán vaciar las celosías propuestas. En los próximos días se realizará el vaciado de las celosías.

Figura 11. Moldes negativos y modelos positivos para elaborar molde para vaciado de celosías

Concretos de alto comportamiento

Para el vaciado de las celosías se realizó la propuesta de diseño de concretos de alto comportamiento con materiales especiales que brindarán las siguientes características:

- Diseño 1: concreto de alta resistencia, panel en color blanco.
Se fabrica con cemento portland, polímeros acrílicos, aditivos y fibras poliméricas y con agregados de mármol color blanco con un tamaño máximo en malla de #40.

- Diseño 2: concreto de alta resistencia, panel en color ocre.
Se fabrica con cemento portland, polímeros acrílicos, aditivos y fibras poliméricas y con agregados de mármol color ocre con un tamaño máximo en malla de #40. Con pigmento mineral rojo y amarillo.

- Diseño 3: concreto de alta resistencia con aditivo fotocatalítico integral, panel en color blanco.
Se realizará con concreto de alta resistencia y durante el proceso de mezclado se agrega un aditivo fotocatalítico con propiedades auto limpiantes y descontaminantes.

- Diseño 4: concreto de alta resistencia con micro esferas cerámicas para características térmicas y acústicas panel en color blanco.
Se realizará con concreto de alta resistencia y se adicionará a la mezcla micro esferas cerámicas huecas: Aditivo funcional avanzado y relleno de refuerzo con estructura hueca esférica y composición cerámica. Sus principales características son ligereza, alta resistencia a la compresión, resistencia térmica, acústica, químicamente no reactivo e inerte de color blanco.

Se realizaron pruebas de cilindros de acuerdo a norma es la NMX C 083 ONNCCE 2014. Determinación de la Resistencia a compresión de los especímenes. Obteniendo a la fecha los siguientes resultados.

Pruebas de resistencia concreto alto comportamiento kg/cm2	Diseño 1 alta resistencia color blanco	Diseño 2 alta resistencia color ocre	Diseño 3 alta resistencia fotocatalitico integral color blanco	Diseño 4 alta resistencia microesferas térmicas y acústicas color blanco
24 horas	*333*	*322*	*356*	*274*
3 días	*487*	N/A	N/A	N/A
7 días	*549*	N/A	N/A	N/A
28 días	*554*	*553*	*527*	*420*
28 días	*490*			
28 días	*605*			

Figura 12. Resultados pruebas resistencia a compresión en kg/cm^2

Trabajo futuro

Se están realizando pruebas de aplicación de los prototipos elegidos en planos curvos y rectos, por medio de la generación de definiciones en Grasshopper, con la intención de que los prototipos se puedan adecuar con parámetros y restricciones como elementos de fachada de forma paramétrica. La propuesta tiene como alcance diseñar fachadas y realizar despieces y modulaciones por medio de herramientas paramétricas. En este ejercicio está pendiente la propuesta de fijación y conexión de los elementos, sin embargo, se propondrán conexiones típicas de elementos prefabricados arquitectónicos de fachada de tipo soldado y roscado.

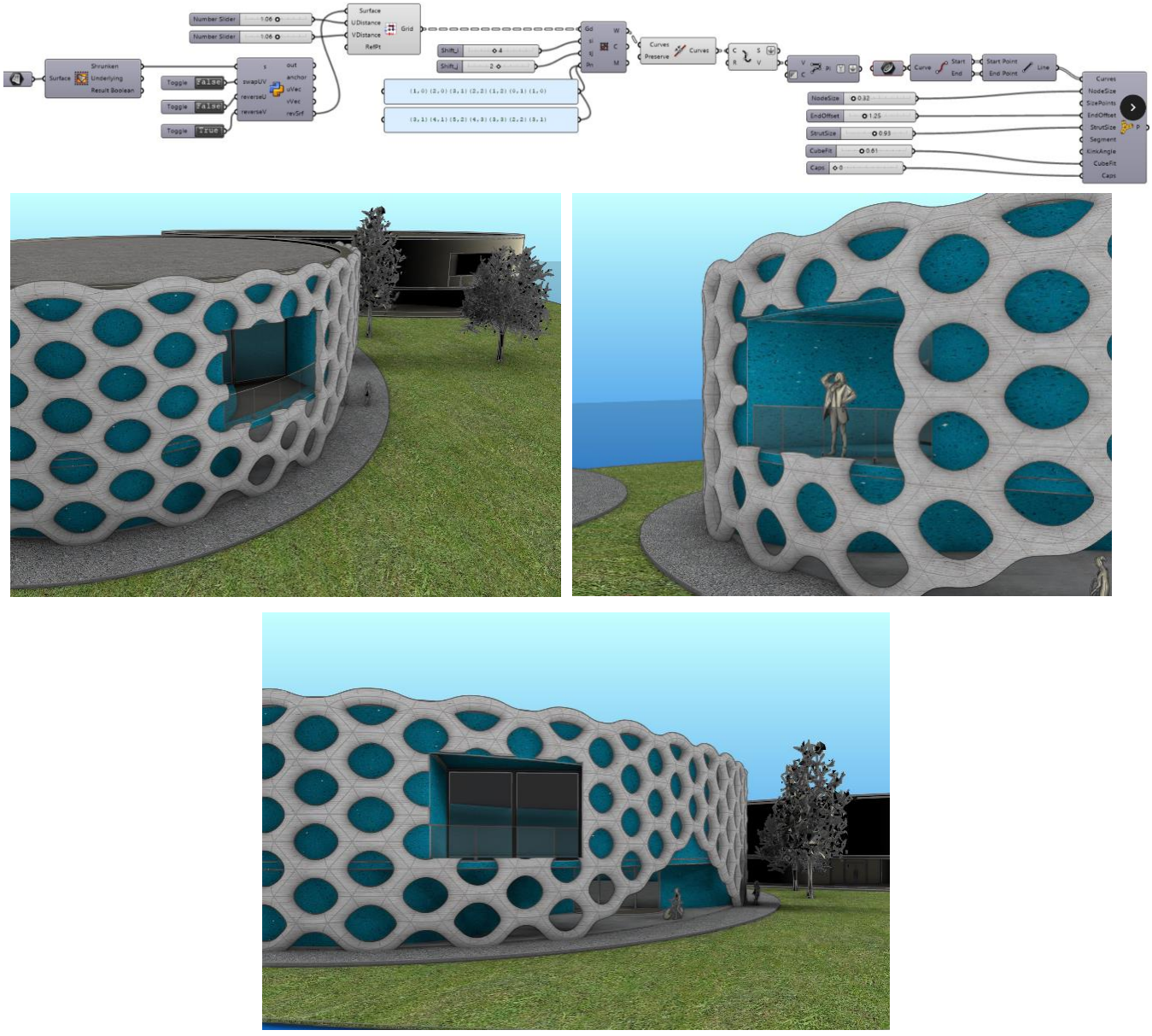

Figura 13. Definición y pruebas digitales de aplicación de prototipos en planos curvos

Conclusiones

Con el avance de investigación a la fecha se han realizado varias propuestas y pruebas tanto digitales como físicas con las que se han obtenido resultados y experiencias aprendidas que permiten confirmar la utilidad de la investigación con los objetivos planteados, entre las conclusiones obtenidas al momento podemos mencionar:

- Se ha comprobado que el utilizar softwares de diseño paramétrico permite obtener un flujo de trabajo que brinda salida de información que puede ser utilizada en diferentes herramientas y equipos de fabricación digital, teniendo resultados con mayor precisión comparada con procesos análogos.

- Se logró reducir el tiempo de elaboración de esquemas y documentación necesaria para la elaboración de planos de moldes y modelos al incluir equipos como el CNC, la impresión 3d y el fresado con brazo robótico.

- Los elementos obtenidos con las herramientas de fabricación digital fueron ensamblados de forma práctica y se logró integrar la experiencia de la mano de obra en este proceso durante la elaboración de los moldes y modelos.

- Los operarios de mano de obra recibieron con agrado el flujo de trabajo propuesto y continuaron con el ensamble y detallado necesario para la elaboración de los moldes planteados.

- Es importante mencionar que en este flujo de trabajo propuesto se pudo comprobar que se requiere de la habilidad y destreza del operario humano para realizar detalles y ajustes necesarios, este proyecto considera que la combinación de herramientas digitales con la experiencia del prefabricador brinda mejores soluciones y se ha comprobado con los ejercicios planteados.

- Queda abierta la posibilidad de experimentar y seguir probando con herramientas de fabricación digital y materiales para la elaboración de moldes y modelos, hay que explorar la aplicación en diseño, despieces, modulaciones, proponer formas y texturas que puedan generarse por medio de patrones en secciones de planos curvos y rectos.

- Finalmente se debe pensar en cómo las herramientas digitales pueden ayudar a proponer soluciones constructivas a problemas complejos, analizar de qué forma la prefabricación puede evolucionar a un diseño paramétrico, integrar las restricciones y condicionantes a los parámetros de generación de formas y geometrías durante la creación de códigos y definiciones en los softwares de diseño digital. La investigación es un pequeño acercamiento a estas herramientas y algunas aplicaciones de las cuales queda mucho camino por investigar y recorrer.

Bibliografía

S. H. Kosmatka, B. Kerkhoff, W. C. Panarese y J. Tanesi, Diseño y Control de Mezclas de Concreto, Skokie, Illinois: Portland Cement Association, 2004.

E. Arellano Méndez, D. Manzanares Ponce, J. G. Mecalco Díaz, A. L. Reyes Zamorano y M. E. Rodríguez Rodríguez, Manual de Diseño de Estructuras Prefabricadas y Presforzadas, 2ª. ed., Ciudad de México: Asociación Nacional de Industriales del Presfuerzo y la Prefabricación A. C. (ANIPPAC), 2018.

Precast/Prestressed Concrete Institute, Architectural Precast Concret, 3rd ed., Precast/Prestressed Concrete Institute, 2007.

G. Alvarado y L. Gottlieb, Diseño paramétrico en Arquitectura; método, técnicas y aplicaciones., ARQUISUR, pp. 18-27, 2013.

W. Thomas y T. Bigue, Differentiating parametric design: Digital workflows in contemporary architecture and construction, Design Studies, 52 , pp. 173-197, 2017.

S. Navarrete, Diseño paramétrico. El gran desafío del siglo XXI,» Cuadernos del Centro de Estudios en Diseño y Comunicación. Ensayos, nº 49, pp. 63-72, 2014.

A. Eltaweel y Y. Su, «Parametric design and daylighting: a literature review,» Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 73, p. 1086–1103, 2017.

A. L. G. Rodrigo García Alvarado, «Diseño paramétrico en Arquitectura; método, técnicas y aplicaciones.,» ARQUISUR, pp. 18-27, 2013.