

NUEVAS FORMAS PARA LAS COLUMNAS DE HORMIGÓN^{1,2}

NEW SHAPES FOR CONCRETE COLUMNS

RODRIGO GARCÍA ALVARADO* DAVID JOLLY MONGE* ALEXIS SALINAS ARRIAGADA* CLAUDIA MUÑOZ SANGUINETTI*

o

Rodrigo García Alvarado³
Universidad del Bío-Bío
Concepción, Chile

David Jolly Monge⁴
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Valparaíso, Chile

Alexis Salinas Arriagada⁵
DGNL Studio
Concepción, Chile

Claudia Muñoz Sanguinetti⁶
Universidad del Bío-Bío
Concepción, Chile

Se investiga una nueva técnica de moldaje del hormigón a través de la “exploración formal”

Resumen

La **exploración formal** es un proceso de investigación mediante el diseño que considera sus propias condiciones para ampliar los resultados posibles. Este artículo presenta una estrategia de diseño paramétrico para columnas de hormigón ejecutadas con **moldajes de telas**, con el fin de apoyar el desarrollo creativo de esta técnica en composiciones arquitectónicas, promoviendo nuevas posibilidades tectónicas y espaciales. La estrategia desarrollada se basa en un sistema de **encofrado** compuesto de textiles con soportes verticales que generan columnas circulares, el cual se ha probado en modelos a escala y en elementos de tamaño real. El diseño paramétrico se establece a partir de una secuencia de **círculos** de radio y altura variable, además de un desplazamiento lateral que se define mediante un programa computacional que permite generar una variedad de diseños de columnas. La implementación paramétrica permite comprobar la **versatilidad** formal de estas capacidades constructivas, así como revisar condiciones de ejecución y estructura. Sugiere además **nuevas posibilidades** espaciales, de distribución, análisis y fabricación, evidenciando con ello la potencialidad arquitectónica del sistema digital y de los moldajes flexibles.

Palabras clave

arquitectura; columnas; diseño paramétrico; hormigón, moldaje flexible

Abstract

Form-finding is a process of research by design, which considers its own conditions to increase the amount of possible results. This article presents a parametric design strategy for concrete columns using fabric formwork, in order to support the creative development of this technique in architectural compositions. This strategy is based on a formwork system composed of textiles with vertical supports to generate circular columns, which has been tested in scale models and real-size elements. The parametric design of the system is established from a sequence of circles with variable radius and height, in addition to lateral displacement, elaborating a computational programming that allows generating a variety of column designs. Parametric implementation allows verifying the formal versatility of these constructive capacities, as well as reviewing execution conditions and structure, and suggesting new spatial, distribution, analysis and manufacturing possibilities, evidencing the architectural potential of the digital system and flexible formworks.

Keywords

architecture; columns; concrete; flexible formwork; parametric design

La exploración formal ofrece nuevos conocimientos para la arquitectura.

El proceso constructivo del hormigón armado ha producido formas ortogonales limitadas.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la arquitectura se basa, entre otros aspectos, en la **exploración formal** de posibilidades constructivas y sus cualidades tectónicas (Frampton, 1999). Actualmente, esto se enmarca en lo que se conoce como la “investigación-por-diseño” (*research-by-design*), que incluye procesos en que se elaboran y prueban distintas alternativas, verificando condiciones y ampliando los resultados posibles (Stojanović & Cerović, 2013). Estos procesos tienen el fin de desarrollar nuevo **conocimiento**, tanto de las posibilidades generadas, como de la estrategia aplicada e incluir la experimentación con distintos materiales o técnicas de ejecución para lograr nuevos repertorios arquitectónicos (Hauberg, 2011).

El **hormigón armado**, en especial desde principios del siglo pasado, ha permitido desarrollar capacidades estructurales y geométricas para obtener nuevas formas y condiciones espaciales (Ledesma, 2014). Sin embargo, como es un material cuya forma final se obtiene al ser contenido por un molde —mientras pasa del estado de argamasa semilíquida al estado sólido— sus posibilidades están **restringidas** a la geometría configurante. Usualmente los componentes disponibles para moldear el hormigón son planos **ortogonales**, como placas de madera o tableros metálicos, por lo que —a excepción del notable trabajo de Pier Luigi Nervi—, gran parte de las edificaciones y sus elementos son volúmenes prismáticos, que dejan fuera otras posibilidades para el hormigón como los mantos de doble curvatura u otras configuraciones presentes en técnicas ancestrales como la piedra tallada. Actualmente, se dispone de nuevos materiales, geotextiles o láminas plásticas, que permiten realizar configuraciones variables, con la terminación y resistencia adecuada para el hormigonado (Hawkins et al., 2016), gracias a ellos se han abierto nuevas **posibilidades** formales que pueden ser respaldadas por procesos de diseño y análisis digital.

ELABORACIÓN DE COMPONENTES DE HORMIGÓN CON MOLDAJES FLEXIBLES

El empleo de moldajes flexibles para hormigonados es de larga data, se pueden encontrar **ejemplos** desde la antigua Roma hasta el siglo pasado, durante el cual se desarrollaron experiencias en Estados Unidos y en España (Veenendaal, West & Block, 2011). El actual campo de investigación se ha visto potenciado, de manera particular, por el trabajo de **Mark West** en el laboratorio C.A.S.T. de Canadá (West, 2016), quien ha experimentado con distintos procesos y materiales. Una

tesis doctoral realizada en este laboratorio (Orr, 2012) determinó las características técnicas de ejecución de distintos componentes estructurales (Orr, Darby, Ibell, Everden & Otlet, 2011) y sus propiedades visuales (Orr, Darby, Ibell & Everden, 2012). Además se han estudiado sus atributos resistentes (Delijani, West & Svecova, 2015), se han desarrollado moldajes de fibra de plástico reforzado (Funke, Gelbrich, Ehrlich, Ulke-Winter & Kroll, 2014), sistemas inflables (Kromoser & Huber, 2016), así como también geotextiles de composiciones variables (Brennan, Pedreschi, Walker & Ansell, 2013), sumado al desarrollo de elementos decorativos o componentes optimizados (Hawkins et al., 2016), demostrando con ello la capacidad de generar prototipos masificables (Chandler, 2015), pero que aún contemplan **limitaciones** de fabricación, así como de integración en el diseño arquitectónico.

La investigación que le da origen a este trabajo está dedicada a darle nuevas formas a las **columnas** en hormigón armado y quiere abrir un nuevo lenguaje espacial para los arquitectos, junto con constituir una posibilidad constructiva que se pueda realizar en cualquier obra en el país. Se basa en la experimentación con diferentes componentes de hormigón, los que fueron realizados con **moldajes textiles**, de modo de estudiar su ejecución constructiva con diferentes variaciones formales (Jolly, Eyquem y Jolly, 2011). Dado que las columnas constituyen un elemento significativo de aplicación, por su seriación y versatilidad arquitectónica (Bjørnland, 2015), su desarrollo en este proyecto ha considerado posibilidades de **curvaturas** —dimensionadas perceptualmente a través de modelos a escala—, además de una técnica de ejecución a tamaño real con tableros rebajados según diferentes perfiles, donde se adhieren telas para conformar el volumen, las que son instaladas verticalmente para el vertido superior de hormigones dúctiles, utilizando para ello una enfierradura interior y soportes laterales y generando columnas con diferentes curvaturas (Figura 1).

El proceso constructivo se ve direccionado principalmente por los requerimientos y materiales necesarios para la obtención de columnas de hormigón que respondan a las formas **planteadas** (rectas, inclinadas, aguzadas, entre otras) y con un grado de esbeltez considerable (relación longitud y dimensiones de las secciones transversales), lo cual implica mantener los resguardos necesarios para una correcta ejecución *in situ*. Al respecto, se utilizó una estructura portante de

Se han hecho investigaciones en la materia del molde flexible donde destacada la de laboratorio CAST, pero aún tienen limitaciones arquitectónicas y de fabricación

La investigación busca dar nuevas formas a las columnas en el uso de moldajes textiles.

Los materiales usados para los moldajes eran barras de acero y planchas de terciado.

La dosificación del hormigón adecuada para su correcto fraguado, el uso de la tela permite filtrar el agua de la mezcla.

tableros terciados de 12 mm para controlar la tensión y fijación de la tela de moldaje, la que fue realizada con un geotextil Pavco Tejido 2100. Para el control de las fuerzas angulares internas de las columnas, se incorporaron cuatro barras de acero estriado de 12 mm de diámetro, con estribos de 8 mm, usualmente separados por 22 cm, a modo de guías para controlar las tensiones internas frente a los esfuerzos estructurales.

Se trabajó con una mezcla de hormigón con condiciones reoplásticas adecuadas para un vertido controlado de las columnas. Para ello se consideraron dosificaciones bajo una razón agua/cemento en un rango entre 0,44-0,48, con acelerante controlado de fraguado, tamaño máximo de árido de 20 mm y una trabajabilidad de la mezcla del orden de 10-12 cm. El control de la cantidad de agua es esencial para el logro de la consistencia de la mezcla, dada la eficacia del uso del moldaje flexible (geotextil) el cual, al tener un tejido permeable, actúa como un filtro, regulando el exceso de agua de la mezcla durante el proceso de hormigonado, en tanto aporta al grado de terminación superficial como a la disminución de la presión hidrostática (empuje) del hormigón sobre el moldaje (Solís, 2015). Se estableció de este modo un sistema constructivo adaptable a distintas formas.

DISEÑO PARAMÉTRICO

Por otro lado, los programas de dibujo computacional han incorporado recientemente capacidades de definir formas mediante valores y relaciones geométricas, lo

que se conoce como diseño paramétrico (Woodbury, 2010). Mediante un lenguaje de componentes (como Grasshopper en Rhinoceros, o Dynamo en Revit) se pueden describir acciones para generar distintas geometrías. De este modo, es factible desarrollar alternativas y disponer de los diseños para distintas aplicaciones (Gürsel, 2012). Con los sistemas paramétricos se pueden producir formas novedosas basadas en reglas geométricas, como también configurar una variedad de diseños para un sistema constructivo (García-Alvarado, Lyon, Cendoya & Salcedo, 2013). El diseño paramétrico permite organizar condiciones geométricas y reproducir distintas variaciones (Jabi, 2013), generando formas complejas que han suscitado incluso la declaración de un nuevo estilo arquitectónico: el parametricismo (Schumacher, 2009). Lo anterior evidencia la potencialidad expresiva y tectónica de las geometrías parametrizadas (García-Alvarado & Jofré, 2012), como también el impulso de nuevas cualidades espaciales y arquitectónicas.

Se han realizado algunas experiencias de diseño paramétrico con moldajes flexibles, pero fundamentalmente para preparar los encofrados (Reinhardt, Saunders & Burry, 2016). Las formas obtenidas con los moldajes flexibles hasta hoy no han podido ser cabalmente emuladas por un software computacional (Veenendal & Block, 2011). Esto ocurre en parte porque entre la tela tejida con una trama ortogonal y la argamasa del hormigón se produce una negociación donde actúa la gravedad del material y el modo cómo

El diseño paramétrico ha hecho aparecer nuevas alternativas para el diseño y la arquitectura.



Figura 4. Registro de carga de usos de actividades en el espacio público en el barrio Esmeralda durante el boulevard de verano, a través del método captura estática implementado en la jornada de la tarde en el mes de febrero. Fuente: Elaboración propia.

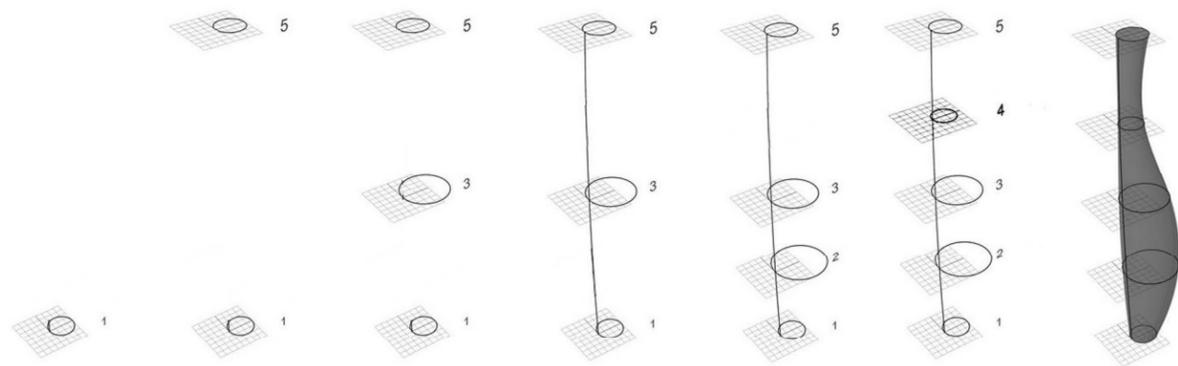
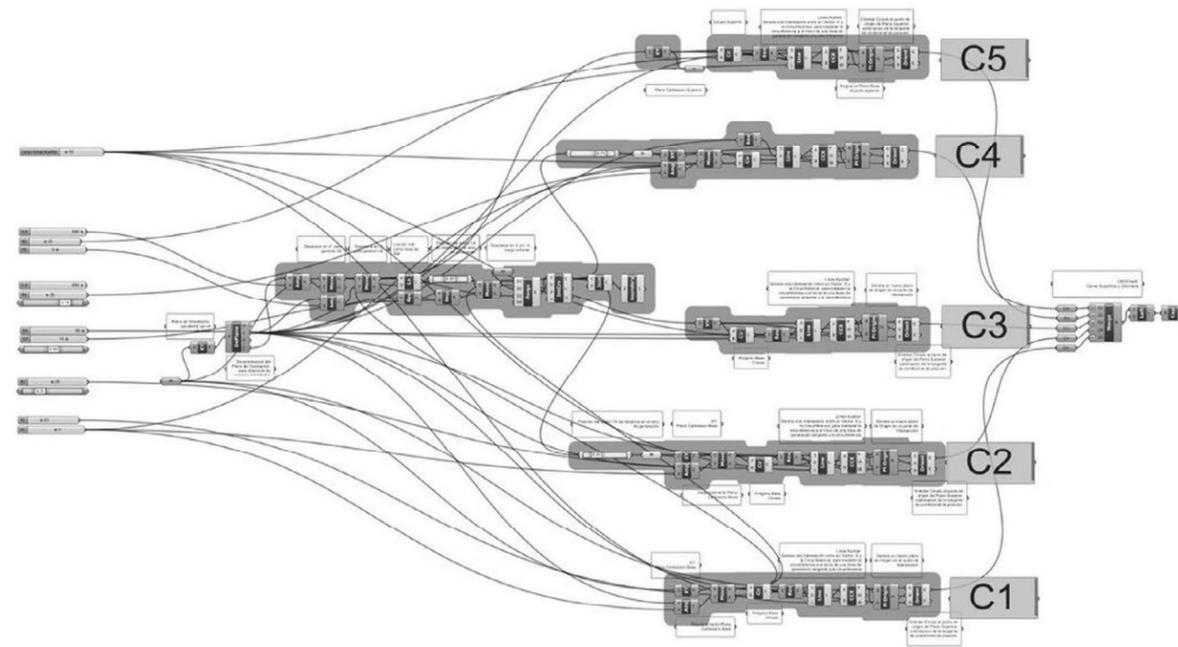


Figura 2. Programación paramétrica en Grasshopper (arriba) y estrategia de definición geométrica por circunferencias en un eje vertical (abajo).
Fuente: Elaboración propia.

Si bien no existe manera de emular computacionalmente un moldaje flexible, si logra una sistematización paramétrica.

la tela está sujeta a los soportes rígidos. Esta negociación no permite obtener cualquier forma, el textil con el peso del hormigón se deforma entre determinados límites. Es por eso que este estudio comienza una vez logradas ciertas formas y no al revés. Las variaciones obtenidas por el diseño paramétrico deberán verificarse nuevamente con modelos para tener la certeza de su constructibilidad. Sin embargo, mediante el diseño paramétrico se puede disponer de una configuración general de los elementos basados en las condiciones de ejecución. Por lo que, de acuerdo con el proceso establecido para ejecutar columnas de hormigón con moldajes flexibles, este trabajo plantea una sistematización paramétrica, con el fin de facilitar y extender su aplicación arquitectónica.

METODOLOGÍA

El procedimiento paramétrico consiste en definir reglas geométricas en una plataforma computacional para

generar diseños digitales, en este caso, columnas construibles con la técnica de hormigonado con moldajes flexibles, con el fin de expandir la variedad de formas ejecutadas con el sistema constructivo planteado. El procedimiento genera modelos geométricos digitales que permiten visualizar volúmenes, así como también desarrollar los planos e instrucciones de ejecución, realizar análisis materiales, composiciones espaciales y presentaciones realistas.

La elaboración del programa se basó primero en un registro fotográfico de las columnas ejecutadas, como también de los moldajes y trazados de preparación. Luego se efectuaron mediciones proporcionales y una categorización de las condiciones formales. Posteriormente, se elaboró una formulación geométrica para estimar las reglas y resultados posibles, y se efectuó una programación inicial (Figura 2). Luego se revisaron los rangos y acciones definidas, así como la generación de formas, las que se compararon con las mediciones y fotografías,

El procedimiento paramétrico permite generar diseños y visualizar planos, volúmenes e instrucciones.

La elaboración del programa fue dada por pasos de formulación y revisión.

La programación fue dada por circunferencias de diferente diámetros y a diferente altura.

Se les fue añadiendo circunferencias a las pruebas avanzando así de "generación"

Existe una curvatura del 1/100 de la altura resultante, pero desaparece según la complejidad de la figura

refinando la programación y revisando la estrategia general y sus alcances para definir finalmente una formulación definitiva y un repertorio de modelos de prueba.

ESTRATEGIA DE DEFINICIÓN GEOMÉTRICA

La programación se basó en establecer cinco circunferencias en un eje vertical para desarrollar diferentes posibilidades formales mediante la modificación de diámetros, alturas y desplazamientos laterales. La cantidad de circunferencias intermedias permite mayor diversidad morfológica, sin embargo, complejiza la programación y su utilización. Ante esto, se planteó una programación inicial con una inferior, otra superior y una intermedia (tres circunferencias en total) y luego una formulación más avanzada, con dos y tres intermedias (cinco circunferencias en total), lo que se presenta en la Figura 2 de izquierda a derecha.

Las formas básicas de las columnas que se obtuvieron manteniendo la circunferencia intermedia con medidas similares respecto de las extremas, se consideraron como de primera generación. Luego se amplió la diversidad geométrica modificando la circunferencia intermedia, lo que fue reconocido como una segunda generación. Posteriormente, se agregó una circunferencia adicional en el tramo inferior, lo que se denominó tercera generación, y otra en el tramo superior, dando origen a la cuarta generación. Podrían seguir agregándose vía programación nuevas circunferencias y condiciones geométricas de modo de aumentar el repertorio de formas.

Las circunferencias se distribuyeron en un eje perpendicular a la base, con un arco lateral configurado al desplazar el círculo intermedio 1/100 de la altura, para expresar la deformación lateral de las columnas ejecutadas que se produce por la extensión de la tela en el costado opuesto a los soportes por la presión del hormigón

depositado. Esto se reconoce en las columnas más básicas, pero en las más complejas pasa desapercibido.

VARIABLES PARAMÉTRICAS

La definición paramétrica de las circunferencias considera tres variables; el radio (R), que establece su dimensión principal; la altura (H) con respecto a la base; y el desplazamiento lateral (D) que genera la variedad de siluetas en las columnas. Cada circunferencia se reconoce con una numeración, desde la inferior (circunferencia 1) a la superior (circunferencia 5), y las variables asumen esta designación. Si se considera que altura de la primera circunferencia (H1) es nula (valor cero), dado que queda en la base, y que la altura de la quinta circunferencia (H5) corresponde a la altura total de la columna, en la primera generación (en que se define solo la circunferencia inferior y superior) se pueden modificar cinco variables (radio y desplazamiento de la circunferencia inferior; radio, altura y desplazamiento de la superior). En la segunda generación (con la circunferencia intermedia controlable), se pueden definir ocho variables; en la tercera generación, 11 variables; y en la cuarta, 14 variables en total (Tabla 1).

Los valores para los parámetros se han definido en centímetros, en un rango de mínimo a máximo, equivalentes a las medidas posibles de construir con el sistema de moldajes flexibles (Tabla 2). Aunque las columnas edificadas a la fecha han sido más reducidas, es viable ejecutar alternativas más variadas. Tampoco se han considerado los desplazamientos laterales en las columnas realizadas hasta ahora, pero sí en los modelos menores. Las alturas pueden alcanzar desde un valor cero, equivalente a la base, hasta un total de 1.000 cm (10 m), aunque las columnas construidas han llegado solo hasta los 5 m. Los radios se contemplan desde 10

A cada círculo se le puede variar la altura, el radio y el desplazamiento lateral.

Se afirman las medidas mínimas y máximas contempladas en los modelos virtuales o reales.

Tabla 1
Definición de variables

DEFINICIÓN DE VARIABLES			
	Altura	Radio	Desplazamiento
Circunferencia base	H1 (nula)	R1	D1
Circunferencia inferior	H2	R2	D2
Circunferencia intermedia	H3	R3	D3
Circunferencia superior	H4	R4	D4
Circunferencia final	H5	R5	D5

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2
Rangos de cada variable

RANGOS DE CADA VARIABLE			
Parámetros	Código	Valores (cm)	
		Mínimo	Máximo
Altura base	H1	0	0
Altura inferior	H2	0	1.000
Altura intermedia	H3	0	1.000
Altura superior	H4	0	1.000
Altura final	H5	200	1.000
Círculo base	R1	10	100
Círculo inferior	R2	10	100
Círculo intermedio	R3	10	100
Círculo superior	R4	10	100
Círculo final	R5	10	100
Desplazamiento base	D1	0	100
Desplazamiento inferior	D2	0	100
Desplazamiento intermedio	D3	0	100
Desplazamiento superior	D4	0	100
Desplazamiento final	D5	0	100

Fuente: Elaboración propia.

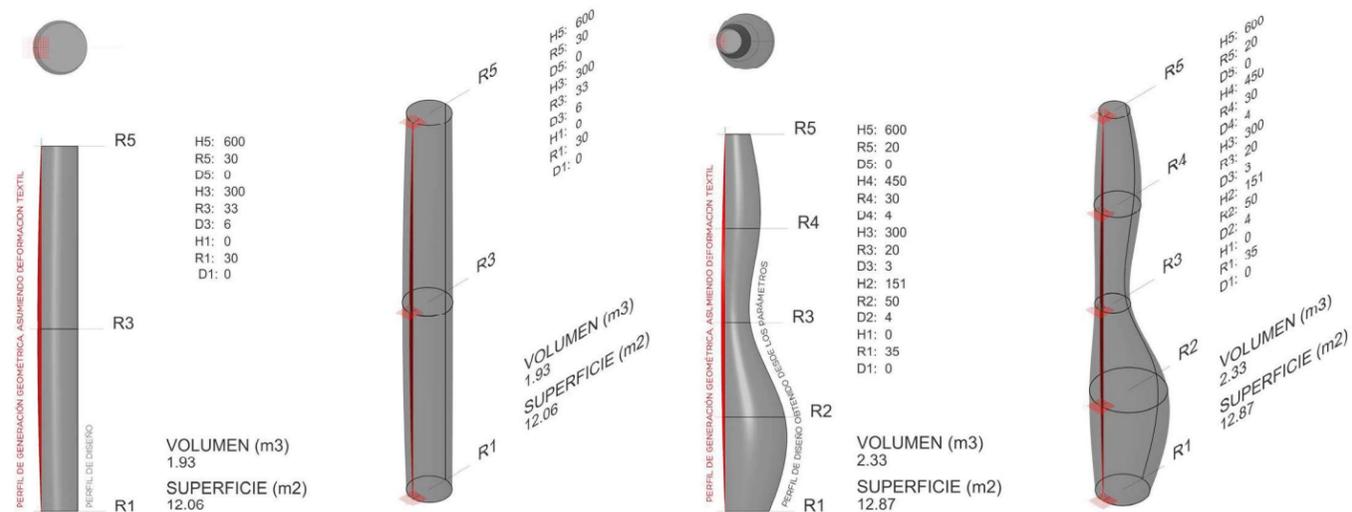


Figura 3. Generación de columnas según diferentes valores paramétricos.
Fuente: Elaboración propia.

a 100 cm, los que producen secciones de 20 cm hasta 2 m de ancho. Las columnas ejecutadas han tenido diámetros desde 30 a 60 cm en los extremos, y hasta un metro en las partes centrales. Los desplazamientos laterales se programaron desde 0 a 100 cm (un metro), aunque las maquetas han asumido variaciones mayores.

La programación inicial se deja con magnitudes medias o nulas por cada variable (denominadas “por defecto”), las que después se pueden modificar para generar las distintas formas. Los valores de altura deben seguir la secuencia establecida. Si algunas circunferencias de radios o desplazamientos son muy disímiles y quedan con alturas próximas, se producen perfiles que no se pueden realizar apropiadamente. Estas condiciones son factibles de restringir mediante la programación.

PROGRAMACIÓN

El procedimiento paramétrico se ha desarrollado sobre software Rhinoceros, con la plataforma de programación visual Grasshopper, estableciendo componentes que permiten trazar las circunferencias, con numeraciones al costado de la programación. La definición del arco lateral se efectuó a partir de las dos circunferencias de extremo y la intermedia, mientras que las restantes se establecieron tangentes al arco. También se contemplaron controles para la programación de las circunferencias intermedias de acuerdo con la generación establecida. Esto facilitó la elaboración de columnas básicas reduciendo las definiciones. Finalmente, se generó el volumen mediante un componente de extensión formal, que se puede transferir a la modelación para modificar, visualizar o enviarlo a otros programas (Figura 3).

RESULTADOS

COMPARACIÓN CON COLUMNAS EJECUTADAS

En primer lugar, la programación puede ser verificada generando diseños similares a las columnas ejecutadas. Estas han sido medidas mediante una digitalización tridimensional realizada por el Centro de Patrimonio

Cultural de la Pontificia Universidad Católica de Chile, PUC, lo que brindó una nube de puntos de los sectores construidos. La digitalización se efectuó con láser terrestre y drones y se desarrollaron 28 archivos de captura por sectores y columnas (Figura 4). Además, se realizaron registros fotográficos individuales de las columnas y de las maquetas. Con la programación se desarrollaron modelos con parámetros equivalentes a las configuraciones ejecutadas (Figura 5), reconociendo una proximidad visual entre volúmenes definidos con el proceso de paramétrico y las piezas construidas que permite evidenciar la capacidad de representación.

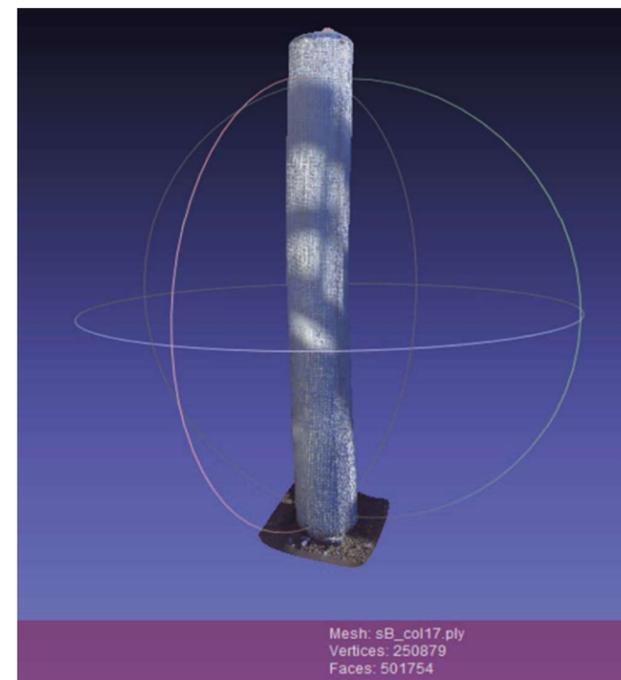


Figura 4. Levantamiento dimensional de columnas
Fuente: Centro de Patrimonio Cultural, PUC.

Hay ciertas configuraciones que no pueden ser realizadas.

El proceso de programación de hace en Rhinoceros a través de la aplicación de las variables.

Se hizo la comparación entre los modelos digitales y las columnas realizadas, y se encontraron similitudes.

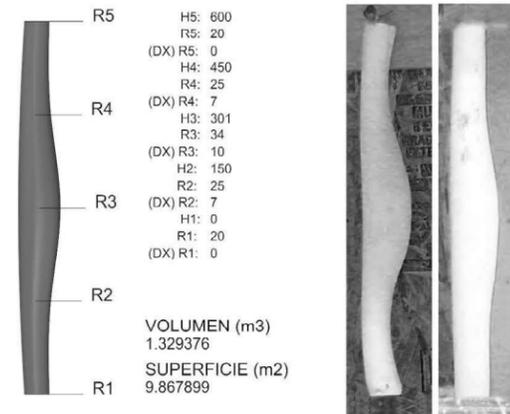
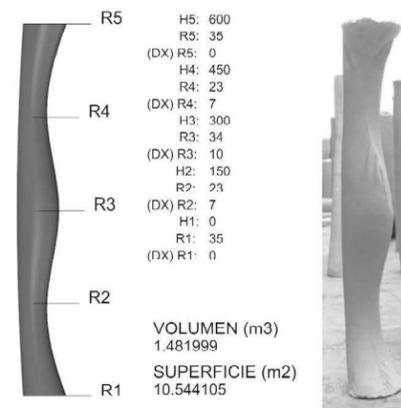
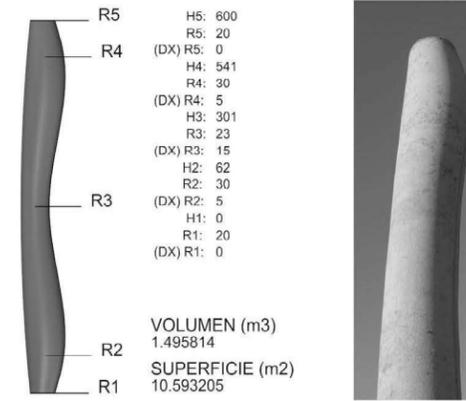
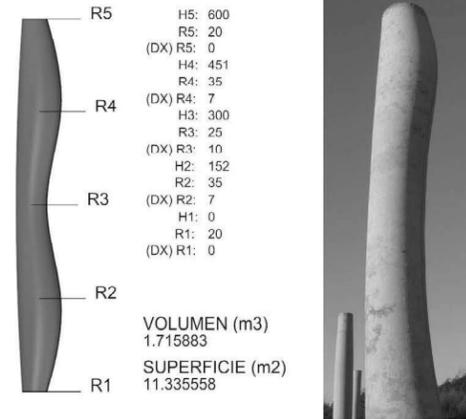
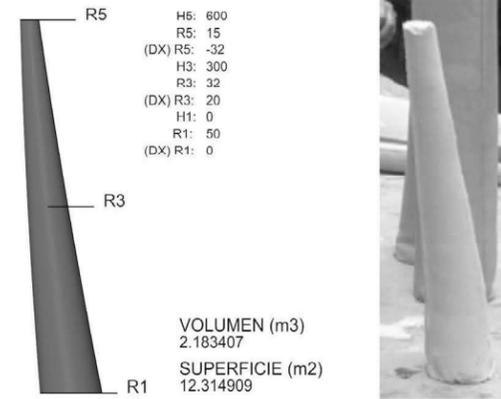
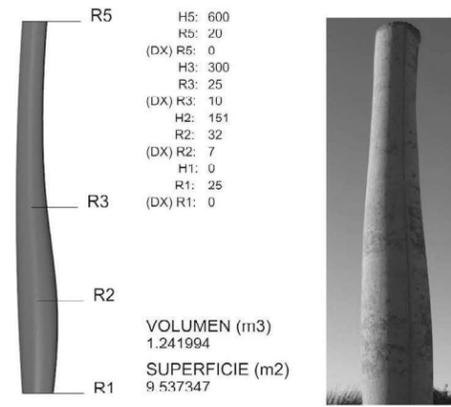


Figura 5. Comparación de modelos generados con la programación y columnas ejecutadas.
Fuente: Elaboración propia.

Se clasifican las formas para revisarlas

Columnas rectas con sección regular de un mismo diámetro

Cónicas variando los diámetros de los extremos

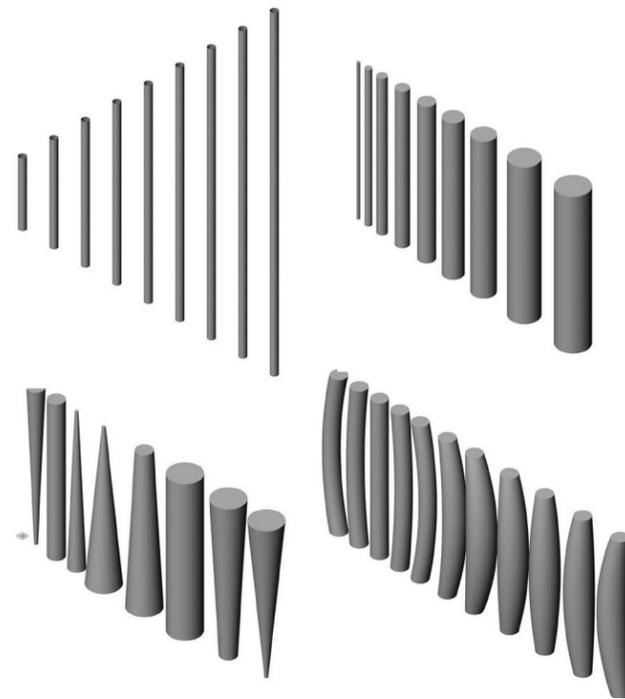


Figura 6. Repertorio de columnas básicas generadas por la programación. Fuente: Elaboración propia.

GENERACIÓN DE NUEVAS FORMAS

Para **revisar** la diversidad formal permitida por la programación se presentan, a continuación, diversos ejemplos con distintas características, los que fueron agrupados según sus condiciones figurativas (Figura 6 y Figura 7).

A) RECTAS

Para definir columnas regulares, se puede utilizar la programación en primera generación, definiendo valores de radio iguales para la primera y última circunferencia ($R1=R5$), y una altura para la última (H5). Esto permite producir columnas de **distintas** dimensiones y proporciones, desde muy esbeltas (por ejemplo 20 cm de diámetro y 10 m de alto, es decir, con una relación de 50/1), hasta muy anchas (200 cm de diámetro y lo mismo de altura, con una proporción de 1/1). En ambos casos, con ligera deformación lateral por el sistema de moldaje, que es más notorio en las columnas más delgadas. Así como también distintas condiciones de ejecución, en cuanto a uso de materiales y soportes necesarios, y de capacidad resistente por pandeo y flexión lateral, que exige mayores refuerzos internos en las columnas más extensas y esbeltas.

B) CÓNICAS

Las columnas de formas **convergentes** hacia el extremo superior o inferior se pueden generar usando valores diferentes en los radios de la primera y última circunferencia ($R1$ y $R5$). El valor menor **determina** el sentido de convergencia, y la diferencia de magnitudes su proporción o agudeza (también con

relación a la altura). Como se mantiene el costado en arco, se produce un **ensanchamiento** inclinado. Un desplazamiento de la circunferencia menor otorga mayor equilibrio formal y capacidad **estructural**. Se pueden obtener columnas ligeramente adelgazadas (con variaciones de pocos centímetros entre los radios y alturas mayores), hasta otras muy amplias, que se reconocen como conos truncados, y que expresan estabilidad. La situación **inversa** produce un ensanchamiento superior, que requiere un reforzamiento estructural interno (o apoyos externos).

C) INCLINADAS

Una columna regular **inclinada**, con un eje vertical en ángulo con respecto al plano base, puede ser definida mediante el desplazamiento de la circunferencia superior (D5) o de la inferior (D1), manteniendo iguales los radios de la primera y última circunferencia ($R1=R5$). El desplazamiento superior (D5) genera una inclinación opuesta al costado del arco, y desplazamiento inferior (D1) produce un ángulo contrario. Debido al rango establecido de desplazamiento lateral hasta un metro y las alturas de 2 a 10 m, las **inclinaciones** oscilarán hasta un máximo de 30° respecto de la vertical, para asegurar su desempeño resistente.

D) AGUZADAS

Las columnas con una reducción curva cóncava, que sugiere una **agudeza**, se pueden definir con la programación en segunda generación. Con una diferencia de **radios** entre la circunferencia inferior y superior (el menor valor define el sentido de convergencia), y la circunferencia intermedia con un radio menor a la

Columnas inclinadas desplazando el círculo del eje.

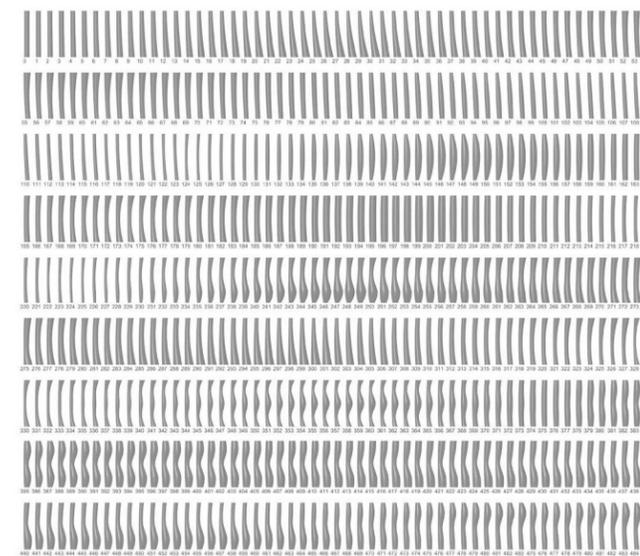


Figura 7. Variaciones de tipologías curvas generadas por la programación. Fuente: Elaboración propia.

La columna Aguzada posee diferentes diámetros en la parte superior e inferior, pero con una curva.

Columna abultada fruto de ensanchar la circunferencia media

Columna angostada con circunferencia intermedia menos a los extremos.

Columnas con ensanchamiento remarcado, fruto de mas de 3 cambios de circunferencia.

media entre ambas. La altura total y las diferencias de radios establecen la proporción de **agudeza**. La altura intermedia puede generar distintos perfiles. El desplazamiento de la circunferencia de menor radio (el extremo agudo) genera **inclinación** o centralidad de la columna, la que se puede mitigar o invertir con desplazamiento en el otro extremo. El desplazamiento de la circunferencia intermedia en una proporción diferente produce un **eje curvado** que incrementa su expresión formal. La **proporción** incide también en su capacidad resistente y complejidad de ejecución.

E) ABULTADAS

Se pueden definir también columnas **ensanchadas**, con la circunferencia superior e inferior de similares o distintos radios, y la intermedia de radio mayor a ambas. Se pueden generar distintas **proporciones** según las magnitudes en relación con la altura, y diferentes perfiles de acuerdo con la altura intermedia. Si la altura es menor a la media, se otorga una mayor **estabilidad**. Al contrario, si es superior, se genera una **inestabilidad**, especialmente sin desplazamientos. Si el radio intermedio es **mayor** que ambas circunferencias, el ensanchamiento es más notorio. El desplazamiento de la circunferencia superior permite **equilibrar** la figura, otorgando simetría lateral, lo que brinda también un mejor comportamiento estructural y de fabricación.

F) ANGOSTADAS

Para columnas que **reduzcan** su figura en el tramo central, se puede programar un radio de la circunferencia intermedia (R3) menor a los extremos, produciendo una concavidad central. Si los radios de las circunferencias extremos son distintos, se produce una forma con **asimetría** vertical. El desplazamiento de la circunferencia superior permite agudizar o equilibrar la forma, y si es de la inferior ocurre un estrechamiento o inclinación hacia abajo, pero en ambos casos se complejiza el desempeño estructural y la ejecución, debido a la ubicación del centro de masa fuera del eje central que induce una **desestabilización**. El desplazamiento de la circunferencia intermedia permite **compensar** el angostamiento, otorgando simetría y estabilidad.

G) BULBO INFERIOR

Para columnas con un **ensanchamiento remarcado** (es decir, que no sea progresivo, sino con curvaturas diferentes entre el tramo superior e inferior), se puede utilizar la programación en tercera generación, que produce un abultamiento. **Mediante** un radio mayor en la circunferencia intermedia inferior (R2), con respecto a la circunferencia intermedia (R3), y lo mismo respecto de las circunferencias inferior y superior. Las magnitudes de radio en relación a la altura total establecen las proporciones, y las alturas intermedias pueden modificar el perfil e intensidad del bulbo. El

desplazamiento de la circunferencia superior puede generar una curvatura mayor opuesta al bulbo, **equilibrando** su figura. Los desplazamientos de la circunferencia intermedia o intermedia-inferior pueden generar una curvatura cóncava que acompaña el **perfil** de bulbo, aunque dificulta la ejecución. El abultamiento inferior le otorga **estabilidad** a la columna, aunque las curvaturas menores desplazan los ejes de apoyo.

H) BULBO SUPERIOR

Las columnas con **ensanchamiento** superior se pueden definir con la programación en cuarta generación, estipulando el radio de la circunferencia intermedia-superior (R4) para que sea mayor que la intermedia y los extremos. El desplazamiento de la circunferencia superior puede insinuar un mayor **desequilibrio** formal, y el desplazamiento inferior compensar la figura. De manera similar, el desplazamiento puede acompañar al bulbo, generando un eje curvado. Sin embargo, el abultamiento superior eleva la masa de la columna, exigiendo mayor **refuerzo** estructural interno y complejiza la fabricación.

I) DOBLE BULBO

Se pueden definir columnas con **dos ensanchamientos** (y, por ende, con un angostamiento central), mediante radios mayores en ambas circunferencias intermedias inferior y superior. Con **magnitudes** similares se pueden generar perfiles simétricos en la vertical o más variables según dimensiones y alturas, aunque si son muy próximos resultan complejos de ejecutar. **Desplazamientos** de la circunferencia inferior o superior pueden compensar los bulbos, y los desplazamientos intermedios pueden acompañar el abultamiento, generando ejes curvos de la columna.

J) DOBLE ANGOSTADA

Las columnas con circunferencias intermedias de radios menores a las circunferencias de extremos y central presentan un **doble angostamiento** (o triple ensanchamiento). Se generan **siluetas** con simetría vertical si son dimensiones equivalentes, o diversas con valores distintos en radios, alturas y desplazamientos, incluyendo también curvaturas generales. Con mayor estabilidad que los dobles abultamientos, presentan sin embargo mayor **fragilidad** de rotura frente a los pandeos o fuerzas laterales y exigen refuerzos especiales.

K) CURVAS

La definición de columnas **curvas** se puede programar con magnitudes de desplazamiento en las circunferencias intermedias (que sean distintas a desplazamientos de extremos), o de uno de los extremos, manteniendo una intermedia. Debido a las **magnitudes** mínimas y máximas definidas, los desplazamientos generan proporciones que sugieren estabilidad, aunque con menores alturas, angostamientos o ensanchamientos asociados se puede requerir de reforzamientos de enfie-

Columna con bulbo superior en general mas inestable.

Doble bulbo formado por 5 circunferencias

Doble angostada, son mas estables y mas frágiles.

Múltiples curvaturas pueden formarse complejizando o simplificando la elaboración

Es posible hacer composiciones diversas con modelos digitales

La variedad de columnas resultantes de los parámetros provee de posibilidades a la obra.

radadura estructural. El desplazamiento de una circunferencia intermedia puede generar una curvatura amplia cóncava. El desplazamiento de circunferencias intermedias puede, a su vez, producir curvaturas diferentes, y si este es invertido, generar un perfil en "S". Si se desplazan las tres intermedias en distintos sentidos consecutivos, se produce un perfil en "M". La relación con ensanchamientos o angostamientos puede compensar o enfatizar estas curvaturas, generando columnas más equilibradas o que se extienden en un costado y altura, aunque su estabilidad y ejecución se complejiza.

COMPOSICIONES ESPACIALES

Los diseños digitales de las columnas permiten también elaborar composiciones espaciales, con distribuciones lineales, radiales o rectangulares, que consideran la repetición de una misma columna, así como también su rotación o la combinación de varias de ellas, y permiten la realización de vistas generales, en axonométrica o perspectiva, a nivel peatonal para revisar la percepción espacial. Además, se pueden aplicar distintos tratamientos superficiales, efectos luminosos, apariencias de las bases, imágenes de fondo o modelos urbanos o de edificios, para evaluar su expresión e integración en ambientes naturales o construidos.

La variedad de columnas posibles es exponencial a la cantidad de parámetros y rangos de dimensión. En la primera generación, en centímetros hay 800 variaciones de altura, 180 de radio del círculo inferior y 360 del superior, lo que genera 51.840.000 alternativas (aunque las diferencias menores son difíciles de percibir). Combinando mayor cantidad de parámetros, se pueden producir miles de millones de alternativas. A su vez, para las composiciones se pueden combinar variaciones distintas, incrementando potencialmente las posibilidades de configuración. Aun cuando el diseño paramétrico entrega una gran cantidad de alternativas, para llegar al cuerpo construido es necesario evaluar las condiciones constructivas y estructurales, así como sus propiedades espaciales. Ello, en todo caso, no invalida el hecho de contar con este gran fondo de posibles figuras para determinar variaciones de columnas y composiciones en la singular obra de la que formarán parte.

DESARROLLO TÉCNICO

La disponibilidad de la geometría tridimensional de las columnas, generada por la programación paramétrica, permite elaborar distintos análisis y procesos técnicos, en tanto la información computacional puede ser transferida a diversos programas y equipos, con una descripción consistente (como superficies cerradas continuas). De este modo, el modelo computacional

puede ser cuantificado en sus distintas propiedades geométricas, como el área de cobertura, volumen, magnitudes o secciones en distintos tramos, etc., para estimación de materiales requeridos o determinación de elementos adicionales. También, asumiendo una composición física del volumen, se pueden analizar las capacidades técnicas como la resistencia o deformación frente a distintos esfuerzos, a través de software de cálculo estructural por análisis de elemento finito.

El hecho de construir es un factor determinante en la forma y expresión arquitectónica y, sobre todo, es relevante la influencia de un material sobre el proceso de construcción (Semper, 1860). En concordancia con ello y vinculante con el objeto estudio, se hace necesario abordar la simbiosis producida entre la versatilidad del material hormigón y el uso de moldajes flexibles. En tal sentido habría que tener presente la selección del tipo de mezclas de hormigón desde el punto de vista de desempeño estructural como reológico, así como también el tipo de tela a utilizar en el moldaje, teniendo en cuenta que se comporta esencialmente como una membrana bajo presión de un fluido, que proporciona resistencia a través de la generación de curvas de tensión pura (Abdelgader, West & Gorsky, 2008), por lo que este sistema de conformación estructural es extraordinariamente eficiente en comparación con sistemas de moldajes rígidos (tradicionales), donde la resistencia es a través de la flexión. Considerando entonces que los moldajes flexibles resisten principalmente a tensión, habría que tomar los resguardos necesarios en los elementos rígidos de soporte o marcos estructurales para controlar la tensión de la membrana. En todos los casos, el textil siempre asumirá una geometría de tensión pura entre los soportes que son determinados por el diseño del moldaje (Solís, 2014).

Por otro lado, la descripción geométrica permite elaborar trazados de ejecución para piezas auxiliares como los tableros de moldaje, soportes o las telas, así como también para los componentes internos como las armaduras o elementos de conexión o soporte, como fundaciones, anclajes, cartelas, etc. con un grado de precisión que la estimación de los procesos manuales. No obstante, deben ser verificados y ajustados de acuerdo con las experiencias de trabajo, lo que ciertamente reduce el repertorio posible de alternativas formales, de acuerdo con su comportamiento o factibilidad constructiva, pero provee igualmente un procedimiento de generación de posibilidades, considerando de este modo de este modo en la metodología de diseño, acciones de exploración formal y de verificación de desempeños, así como factibilidades de ejecución para arribar a la propuesta final.

Las ventajas de tener el modelo virtual van desde facilidades al momento de construir hasta cálculos estructurales.

El método constructivo hace que los moldajes flexibles respondan mejor a la tensión.

La descripción geométrica permite crear trazados aumentando el repertorio de las formas posibles

La sistematización paramétrica ha ampliado el repertorio de alternativas en el moldaje flexible

La programación permite elaborar composiciones y analizar comportamientos de las columnas

Es importante verificar los modelos paramétricos para confirmar su factibilidad y espacialidad.

CONCLUSIONES

Este trabajo ha presentado la sistematización paramétrica de columnas de hormigón ejecutables con moldajes flexibles circulares, demostrando la capacidad de una herramienta de diseño para ampliar las posibilidades del proceso constructivo. La implementación computacional de reglas geométricas vinculadas a una estrategia de ejecución permite generar nuevas alternativas formales, y promover sus capacidades técnicas y expresivas, a la vez que facilita ilustrar una estrategia de investigación-por-diseño. Proporciona además un repertorio amplio y ordenado de posibilidades de las formas que podrían tomar las columnas, desde su generación geométrica, que extiende la visión proyectual y constructiva e incentiva la versatilidad arquitectónica, a partir de las condiciones materiales y operativas disponibles, sugiriendo novedosas espacialidades.

La programación realizada permite elaborar diseños de columnas basados en una secuencia vertical de cinco círculos con tres magnitudes variables cada uno (23 parámetros en total), que permiten conformar una variedad de formas en cuatro series de generación. Con ello se demuestra que la elaboración de diseños similares a columnas ejecutadas con moldajes de telas flexibles, y la generación de once tipologías distintas, con una multiplicidad de variantes en cada caso son factibles. Los diseños digitales ejecutados permiten elaborar composiciones, y visualizar sus condiciones espaciales y tratamientos superficiales, además de revisar efectos de iluminación, relación con otros componentes, edificaciones o entornos. Así mismo, el modelo geométrico desarrollado permite una cuantificación volumétrica, análisis de comportamientos materiales y una preparación más cabal de la ejecución.

Se debe considerar que el procedimiento tiene ser validado al menos en dos sentidos. Por un lado, confirmando las mediciones de deformación del textil en los moldajes y columnas ejecutadas para determinar los mantos de doble curvatura con superficies regulares, con el fin de generar en los modelos digitales despieces o patronajes que permitan preparar los moldajes con precisión. Por otro lado, experimentar las formas obtenidas por el diseño paramétrico para asegurar o ampliar las variaciones del repertorio, mediante la ejecución de algunos casos extremos o singulares. Es relevante además, verificar la percepción espacial de las formas generadas y sus relaciones con la configuración de secuencias o combinaciones, ya que producen efectos visuales que pueden ser controlados o definidos en la programación; y comprobar también la experiencia espacial de estos conjuntos en sus tensiones sensoriales y evocaciones significativas respecto de los recorridos y puntos de vista, e incluso en el transcurso del día por la variación de las condiciones de iluminación; así como también

en diversas condiciones de apariencia, situación arquitectónica o localización, que abren distintas connotaciones de percepción y aporte espacial.

Estas posibilidades de diseño y ejecución de nuevas formas arquitectónicas pueden por tanto ser integradas en la práctica profesional y en los proyectos de edificación, ampliando el repertorio constructivo y espacial, así como las experiencias perceptuales. Además, estos procedimientos permiten vincular mayormente el trabajo de obra, el cálculo estructural, el diseño arquitectónico y la exploración artística, promoviendo una colaboración profesional temprana con variación de elementos. Lo que exige modelos contractuales integrales, flexibles y orientados a logros, además de un fortalecimiento de las capacidades técnicas y medios avanzados de comunicación, planeación y gestión de la edificación, considerando

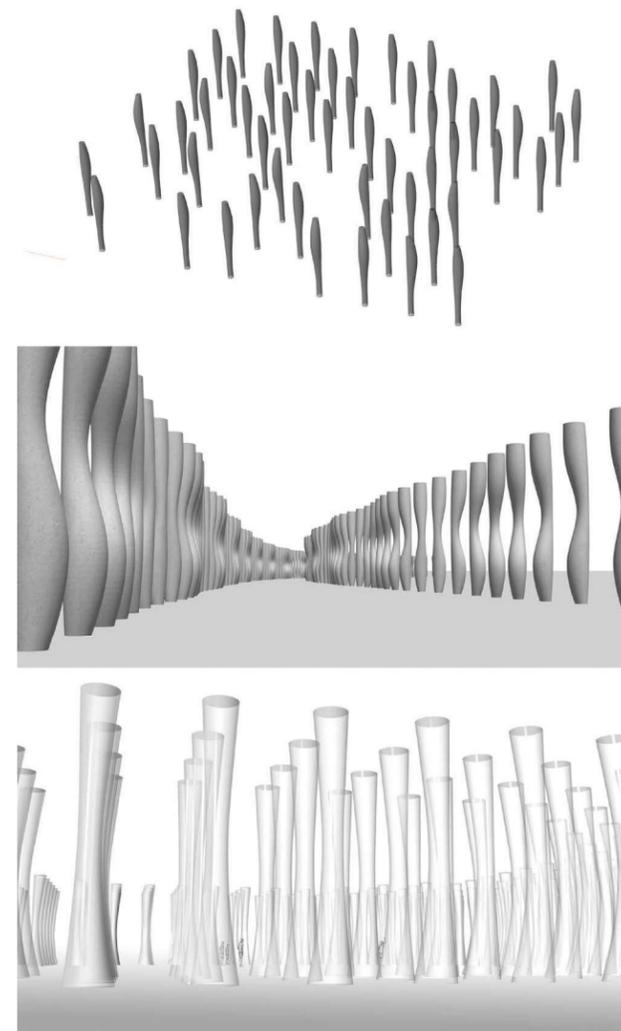


Figura 8. Composiciones de columnas.
Fuente: Elaboración propia.

Se clasifican las formas para revisarlas

Los sistemas digitales permiten relacionar disciplinas

Se proyecta al futuro investigaciones en torno a la sensibilidad y las mezclas de hormigón.

marcos normativos prestacionales. Los sistemas digitales de diseño permiten, por tanto, relacionar diferentes perspectivas y condiciones para ampliar las posibilidades artísticas y técnicas, pero requieren políticas de construcción más flexibles y orientadas a los resultados. Se pueden, no obstante, lograr obras de mayor calidad espacial y material, mediante procesos experimentales de diseño y ejecución, que extiendan las capacidades profesionales y la vivencia de entornos innovadores e inspiradores.

Se advierten futuras líneas de investigación orientadas a sensibilizar variables paramétricas en función de la exploración de nuevas posibilidades espaciales, conjugando condiciones estructurales y de ejecución. Del mismo modo, se puede profundizar en el uso de moldajes flexibles y diseño avanzado de mezclas de hormigón con alta prestación reológica que propicien la potencialidad arquitectónica del sistema digital y de los moldajes flexibles.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdelgader, H., West, H., & Gorsky, J. (Junio, 2008). *State-of-the-Art Report on fabric formwork*. Trabajo presentado en The International Conference on Construction and Building Technology 2008 (ICCBT 2008). Kuala Lumpur, Malasia.
- Bjørnland, K. M. (2015). *Taller de obras moldaje flexible*. Recuperado de http://wiki.ead.pucv.cl/images/b/b9/Fichas_Kristian_Bjornland.pdf
- Brennan, J., Pedreschi, R., Walker, P., & Ansell, M. (2013). The potential of advanced textiles for fabric formwork. *Construction Materials*, 166(3), 229–237. <https://doi.org/10.1680/coma.12.00052>
- Chandler, A. (2015). Fabric formwork – prototype to typology. *The Journal of Architecture*, 20(3), 420-429. <https://doi.org/10.1080/13602365.2015.1042904>
- Delijani, F., West, M., & Svecova, D. (2015). The evaluation of change in concrete strength due to fabric formwork. *Journal of Green Building*, 10(2), 113-133. <https://doi.org/10.3992/jgb.10.2.113>
- Frampton, K. (1999). *Reflexiones sobre el campo de aplicación de la tectónica, poéticas de la construcción en la arquitectura de los siglos XIX y XX*. Madrid: Akal
- Funke, H., Gelbrich, S., Ehrlich, A., Ulke-Winter, L., & Kroll, L. (2014). Unsymmetrical fibre-reinforced plastics for the production of curved textile reinforced concrete elements. *Open Journal of Composite Materials*, 4(4), 191-200. <https://doi.org/10.4236/ojcm.2014.44021>
- García-Alvarado, R. & Jofré, J. (2012). The control of shape: Origins of parametric design in architecture in Xenakis, Gehry and Grimshaw. *METU: JFA*, 29, 107-118 <https://doi.org/10.4305/metu.jfa.2012.1.6>
- García-Alvarado, R., Lyon, A., Cendoya, P., & Salcedo, P. (2013). Parametric development of variable roof structures with central supports (Tulips). *Nexus Network Journal*, 15(2), 257-269. <https://doi.org/10.1007/s00004-013-0153-9>
- Gürsel, İ. (2012). Creative design exploration by parametric generative systems in architecture. *METU: JFA*, 29(1), 207–224. <https://doi.org/10.4305/metu.jfa.2012.1.12>
- Hawkins, W., Herrmann, M., Ibell, T.J., Kromoser, B., Michaelski, A., Orr, J., ... & West, M. (2016). Flexible formwork technologies – a state of the art review. *Structural Concrete*, 17(6), 911–935. <https://doi.org/10.1002/suco.201600117>
- Hauberg, J. (2011). Research by design – a research strategy. *Architecture & Education Journal* 5, 46-56.
- Jabi, W. (2013). *Parametric design for architecture* Londres: Laurence King.
- Jolly, D., Eyquem, M. y Jolly, V. (2011). Encofrados flexibles: otra forma para el hormigón. *ARQ*.78, 58-67. <https://doi.org/10.4067/s0717-69962011000200009>
- Kromoser, B. & Huber, P. (2016). Pneumatic formwork systems in structural engineering. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016, 1-13. <https://doi.org/10.1155/2016/4724036>
- Ledesma, P. (2014). La técnica constructiva en la arquitectura. *Revista Legado de Arquitectura y Diseño*, 15, 21-37.
- Orr, J. (2012). *Flexible formwork for concrete structures* (Tesis doctoral). University of Bath, Somerset, Reino Unido.
- Orr, J., Darby, A., Ibell, T. J., & Evernden, M. (2012). Flexible formwork for visual concrete. *Concrete*, 46(5), 14-16.
- Orr, J., Darby, A., Ibell, T.J., Evernden, M.C., & Otlet, M. (2011). Concrete structures using fabric formwork. *The Structural Engineer*, 89(8), 20-26.
- Reinhardt, D., Saunders, R., & Burry, J. (2016). *Robotic fabrication in architecture, art and design*. Berlin: Springer.
- Schumacher, P. (2009). Parametricism-A new global style for architecture and urban design. *AD Architectural Design - Digital Cities*, 79(4), 14-23. <https://doi.org/10.1002/ad.912>
- Semper, G. (1860). *Der Stil den techniscen und tektonischen kunsten. Vol 1*. Frankfurt: Verlag fur Kunst und Wissenschaft.
- Solis, D. (2015). Encofrado textil. Nuevas formas para el hormigón. Recuperado de https://issuu.com/danisolis/docs/encofrado_textil_nuevas_formas_par
- Stojanović, D. & Cerović, M. (2013). 40F7, Elastic diary of the research by design, architectural education in the post-digital age. *Serbian Architecture Journal*, 5(2), 226-243.
- Veenendaal, D. & Block, P. (Junio, 2012). *Computational form-finding of fabric formworks: an overview and discussion*. Trabajo presentado en International Conference on Flexible Formwork, Bath, Somerset, Reino Unido.
- Veenendaal, D., West, M., & Block, P. (2011). History and overview of fabric formwork: using fabrics for concrete casting. *Structural Concrete*, 12(3), 164-177. <https://doi.org/10.1002/suco.201100014>
- West, M. (2016). *The fabric formwork book: Methods for building new architectural and structural forms in concrete*. Londres: Routledge.
- Woodbury, R. (2010). *Elements of parametric design*. Londres: Routledge.

NOTAS

- 1 Recibido: 17 de julio de 2017. Aceptado: 9 de octubre de 2017.
- 2 Este trabajo se ha elaborado basado en la experiencia del taller de obra del Dr. David Jolly en la Escuela de Arquitectura y Diseño de la Universidad Católica de Valparaíso, con apoyo del proyecto Fondecyt 11140640, y el aporte de investigadores de la U. Bio-Bío y DGNL Studio de Concepción, con apoyo del proyecto Fondecyt 1181015.
- 3 Contacto: rgarcia@ubiobio.cl
- 4 Contacto: david.jolly@ead.cl
- 5 Contacto: a.salinas@dgnlstudio.cl
- 6 Contacto: clmunoz@ubiobio.cl