

Lectura controlada: Nuevas formas para las columnas de hormigon

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 o Dinamo en Revit, sus posibilidades técnicas 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 escalas 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 **controlado** 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.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la arquitectura se basa, entre otros aspectos, en la **exploración** formal de posibilidades constructivas y sus cualidades técnicas (Frampton, 1999). Actualmente, esto se enfoca en lo que se conoce como la “investigación-by-design” (research-by-design), que incluye procesos en que se elaboran y prueban distintos **alternativas**, verificando condiciones y ampliando los resultados posibles (Stojanović & Cerović, 2013). Estos procesos tienen el fin de desarrollar **nuevos conocimientos**, 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 moldaje —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 son volúmenes prismáticos, que dejan fuera otras posibilidades como 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 hormigónado (Hawkins et al., 2016), gracias a ellos se han abierto nuevas posibilidades formales que pueden ser respaldadas por procesos de diseño y análisis digital.

La **forma del hormigón armado es restringida por su moldaje**. Usualmente creando formas **ortogonales**, **nuevos materiales** abren nuevas posibilidades formales.

La **forma del hormigón armado es restringida por su moldaje**. Usualmente creando formas **ortogonales**, **nuevos materiales** abren nuevas posibilidades formales.

La **forma del hormigón armado es restringida por su moldaje**. Usualmente creando formas **ortogonales**, **nuevos materiales** abren nuevas posibilidades formales.

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 (Veenedald & Block, 2011). El acercamiento de 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 desarrollada en este laboratorio (Orr, 2012) **analiza** las características técnicas de ejecuciones de distintos componentes estructurales (Orr, Darby, Ibell, Everden & Odet, 2011) y sus propiedades visuales (Orr, Darby, Ibell & Everden, 2012). Además se han estudiado sus atributos resistentes (Dellian, West & Svevco, 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, 2013). El acercamiento metodológico 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 posibilidades 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 seración y versatilidad arquitectónica (Björklund, 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, tanto se adhieren telas para conformar el volumen, las que son instaladas verticalmente para al vertido superior de hormigones dúctiles, utilizando para ello una enfermerada 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 estabilidad considerable (relación longitud y dimensiones de las secciones transversales), lo cual implica mantener los requisitos necesarios para una correcta ejecución *in situ*. Al respecto, se utilizó una estructura portante de **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 incorporó cuatro barras de **acero** con un diámetro de 12 mm de diámetro, con estríbos 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 reológicas adecuadas para un vertido controlado de las columnas. Para ello se consideraron **dosis**ficciones bajo una razón agua/cemento en un rango entre 0.44-0.48, con acelerante controlado de fraguado, tamaño máximo de gránulo 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 estudió de este modo un sistema constructivo **adaptable** a distintas formas.

El hormigon es estrictamente dosificado, habiendo un efecto de filtro del agua con la tela, que regula la consistencia de la mezcla.

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 Dinamo 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 (Gürel, 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** (Reinhart, Saunders & Barry, 2016). Las formas obtenidas con los moldajes flexibles hasta hoy no han podido ser cabalmente **modeladas** por un software computacional (Veenedald & 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 la tela está sujeta a los soportes rígidos. Esta negociación no permite obtener cualquier forma, el texti 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 constructibles con la técnica del hormigón armado 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** volúmetrías, 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 formas y resultados posibles, y se efectuó una programación inicial (Figura 2). Luego se revisaron los rangos y acciones definidas, así como la generación y el uso de formas, las que se **compararon** con las mediciones y fotografías, 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 intermedia permite mayor **flexibilidad** metodológica, 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 tercer generación, y otra en el tramo superior, dando origen a la cuarta generación. Podrían seguir **agregándose** la 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 (**10m**), aunque las columnas construidas han llegado solo hasta los 5 m. Los radios se contemplan desde 10 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 similares y quedan con alturas próximas, se producen perfiles que no se pueden realizar **apropiadamente**. Estas condiciones son fáciles de **restringir** mediante la programación.

El diseño paramétrico o paramétricismo usa computadoras para generar distintas formas que sigan una regla geométrica, pudiendo uno aplicar estas formas y sus cualidades espaciales como uno desea.

El programa paramétrico entrega formas generales, debiendo verificar si son logrables, ya que no emulan completamente la forma obtenida, habiendo una negociación de la tela, el material y la gravedad.

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 un **digitalizador** tridimensional realizado por el Centro de Patrimonio Cultural de la Pontificia Universidad Católica de Chile, PUC, lo que brindó una nube de puntos de los **sectores** constructivos. La digitalización se efectuó con **láser** y **drone** (**Figura 3**) y se desarrolló 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.

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 generar 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 anchas y esbeltas.

B) COLUMNAS

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≠R5). El valor menor determina el sentido de convergencia, y la diferencia de magnitudes **superoordenó** 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 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 radio externo 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 cura 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 **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 a 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.

Se puede desplazar el círculo intermedio, esto pasa desapercibido en columnas más complejas.

F) ANGOSTADAS

El programa define tres variables: radio, altura y desplazamiento lateral, además de los cinco círculos, teniendo la primera generación cinco variables y la cuarta 14 variables.

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 a 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 **simetría** vertical. El desplazamiento de la circunferencia superior permite aguzar o equilibrar la forma, y si es de la inferior ocurre un estrechamiento o inclinación hacia abajo, pero en ambos casos se compleja 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**.

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 similares y quedan con alturas próximas, se producen perfiles que no se pueden realizar **apropiadamente**. Estas condiciones son fáciles 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 de cada círculo se efectúa a partir de las dos circunferencias de extremo y la intermedia, mientras que las restantes se establecieron tangentes al arco. También se contemplan **controles** para la programación de las circunferencias **intermedias** de acuerdo con la generación establecida. Esto **facilita** 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 programación 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 un **digitalizador** tridimensional realizado por el Centro de Patrimonio Cultural de la Pontificia Universidad Católica de Chile, PUC, lo que brindó una nube de puntos de los **sectores** constructivos. La digitalización se efectuó con **láser** y **drone** (**Figura 3**) y se desarrolló 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.

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 generar 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 anchas y esbeltas.

B) COLUMNAS

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≠R5). El valor menor determina el sentido de convergencia, y la diferencia de magnitudes **superoordenó** 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 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 radio externo 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 cura 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 **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 a 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.

Se puede desplazar el círculo intermedio, esto pasa desapercibido en columnas más complejas.

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 **simetría** vertical. El desplazamiento de la circunferencia superior permite aguzar o equilibrar la forma, y si es de la inferior ocurre un estrechamiento o inclinación hacia abajo, pero en ambos casos se compleja 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**.

El programa empieza con variables por defecto, luego se define una altura y es capaz de restringir alturas que no se puedan construir apropiadamente.

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 de cada círculo se efectúa a partir de las dos circunferencias de extremo y la intermedia, mientras que las restantes se establecieron tangentes al arco. También se contemplan **controles** para la programación de las circunferencias **intermedias** de acuerdo con la generación establecida. Esto **facilita** 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 programación para modificar, visualizar o enviarlo a otros programas (Figura 3).

El programa facilita visualmente el volumen, pudiendo cambiar las variables en un costado, como el arco lateral y las circunferencias intermedias

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 **desplazamiento** formal, y el desplazamiento inferior puede **acompañar** 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 produce 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 diferentes. 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 enladrada 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, los 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** 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