



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CHILE

Facultad de Arquitectura, Diseño y Estudios Urbanos
Escuela de Arquitectura

Resistencia desde la Geometría:

Reducción material por diseño en la optimización estructural
y productiva de geometrías en hormigón

Por

Luciano Lizana G.

Tesis presentada a la Escuela de Arquitectura de la Pontificia Universidad
Católica de Chile, para optar al título de Arquitecto
y Magíster en Arquitectura Sustentable y Energía

Profesores guía:

Renato D'Alençon
Macarena Burdiles

Septiembre, 2020
Santiago, Chile

©2020, Luciano Matías Lizana Gallardo



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
FACULTAD DE ARQUITECTURA, DISEÑO Y ESTUDIOS URBANOS
ESCUELA DE ARQUITECTURA

Santiago, 29 de septiembre de 2020

Señor
Renato D'Alençon
Subdirector de Investigación y Postgrado
Presente

Mediante la presente, acredito que el estudiante Luciano Matías Lizana Gallardo RUT 19.516.457-6 realizó la Defensa de su Tesis, el día 11 de Septiembre de 2020 titulada "Reducción material por diseño en la optimización estructural y productiva de geometrías en hormigón"

Por este medio tengo el agrado aprobar el documento definitivo para su entrega a Biblioteca.

Atentamente,

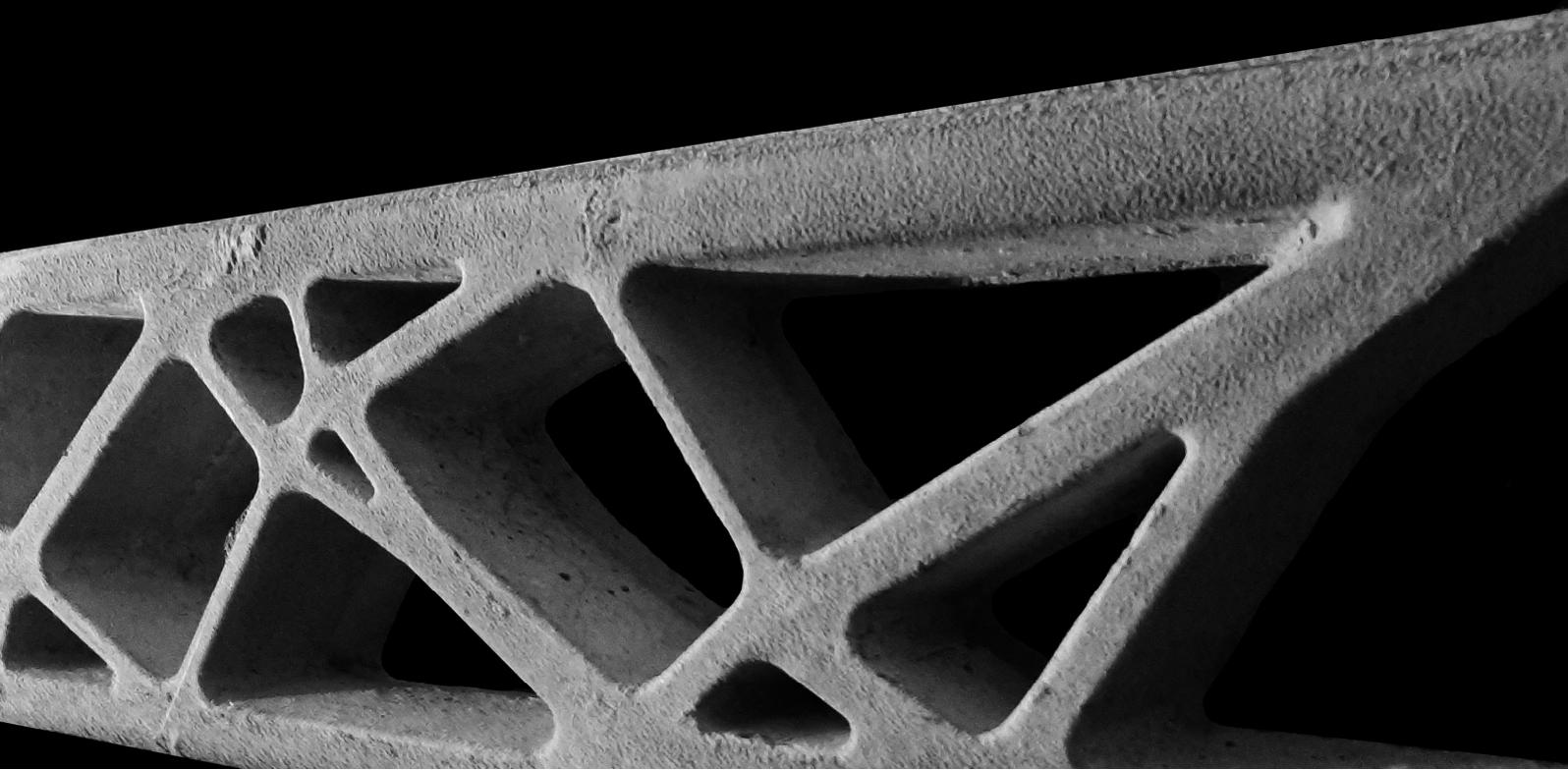
Renato D'Alençon
Profesores Guía
Magister en Arquitectura Sustentable y Energía
Escuela de Arquitectura
P. Universidad Católica de Chile

Macarena Burdiles

Resistencia desde la **Geometría**:

Reducción material por diseño en la optimización estructural y productiva de geometrías en hormigón

Luciano Lizana G.





©2020, Luciano Matías Lizana Gallardo Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica que acredita al trabajo y a su autor

Magíster en Arquitectura Sustentable y Energía
Escuela de Arquitectura
Facultad de Arquitectura, Diseño y Estudios Urbanos
Pontificia Universidad Católica de Chile

Profesores

Macarena Burdiles
Renato D'Alencon

Viga 3: Prototipo físico, Elaboración Propia



Reducción material por diseño en la optimización estructural y productiva de geometrías en hormigón:

El caso de la grilla estructural 8x8.

RESUMEN:

Esta Investigación aborda la problemática de generación de residuos en la construcción y una de las posibles soluciones que pueden surgir desde el diseño, enfocada en el diseño estructural. Explorará la optimización geométrica de componentes estructurales de hormigón por medio de herramientas matemáticas digitales con el fin de reducir la cantidad de masa asociada a estructuras, que se aplicará al caso de una tendencia observada en el diseño estructural dentro del país: el uso de grillas moduladas en 8 y 6 metros producto de la optimización de plantas de estacionamientos. Desde la que se identifican oportunidades productivas conforme a la industria nacional y la integración paralela de otras estrategias de diseño para reducción como el diseño para desensamblado, Coordinación dimensional y estructuras flexibles que serán desarrolladas como subtemas.

Como metodología principal se hará uso de la optimización topológica como herramienta matemática de reducción de masa en componentes estructurales, sumado a la fabricación y prueba de prototipos físicos, entrevista de especialistas, levantamiento de edificaciones, simulaciones en software FEA de análisis estático y levantamiento en visitas a terreno de centros productivos nacionales. Los resultados permiten identificar una serie de restricciones que informan el diseño, presentando en este trabajo sus posibilidades y alternativas posibles a la forma actual de construir, comparables en volumen material y huella de carbono.

Los resultados de esta investigación entendidos como geometrías específicas de vigas que conforman un sistema estructural se aplicarán en el ejercicio proyectual de núcleos de equipamiento urbano, en un modelo de gestión similar al de la red de núcleos Chile, como núcleo PITS Bellavista y Núcleo Ochagavía, al identificar un mismo diseño estructural de 8 por 8 metros común en múltiples programas de equipamiento.

Se emplazará dentro del circuito de subcentros de Santiago, dispuestos en el plan regulador metropolitano de 1992, que recoge intenciones de equipar y densificar nodos en la periferia de la ciudad desde 1960, de ellos se ha seleccionado un cabezal de cuadra de bajo desarrollo frente a la plaza de Maipú para integrar equipamiento faltante en la comuna bajo diversos programas articulados en un mismo diseño estructural flexible.

PALABRAS CLAVE:

Optimización topológica / Coordinación dimensional / DFD (Design for deconstruction) / Form follows force / Prefabricación en hormigón

Índice.

Resumen/Palabras clave	2
Introducción	4
Discusión bibliográfica: Estrategias de reducción por diseño en H.A	6
Optimización estructural	6
Coordinación dimensional / grilla 8x8	7
Producción /Coordinación estructural	9
Flexibilidad programática	12
Diseño para desensamblado	13
Pregunta / Hipótesis	15
¿Cuánto mide?: La grilla 8x8	19
Prototipos	25
Optimización Topológica	27
Análisis estático por elementos finitos	32
Prototipo físico	33
Resultados de Optimización Topológica	40
Resultados de Análisis estático finito	44
Tracción/Compresión	44
Factor de seguridad	47
Tensiones normales	49
Tensiones de Von Mises	50
Observaciones	51
Resultados prototipos físicos	52
Discusión	55
Sistema estructural propuesto	55
¿Que forma tiene?	56
¿Cómo se conecta?	58
Estructura y espacialidad	60
Conclusión	68
Bibliografía	71

Introducción.

En Chile el sector de la construcción representa un 7,8% del PIB¹ y un 8,5% de los empleos². Sin embargo, comprende un 33% de la generación de gases de efecto invernadero³ y un 34% de la generación de residuos⁴. De todos los residuos de la construcción un 79% corresponde a hormigón⁵, en su mayoría escombros que alguna vez fueron estructuras. En otras palabras, solo la demolición de hormigón equivale a un 27% del total de residuos del país.

Ante dicho escenario, esta investigación plantea la reducción por diseño en estructuras de hormigón desde los siguientes problemas:

- 1-En primera instancia, desde la eficiencia estructural de componentes: al utilizar menos hormigón en cada elemento estructural del edificio.
- 2-En segunda instancia, desde la arquitectura: al dotar al edificio de un *layout* estructural flexible y fácil de adaptar, promoviendo la reutilización de la estructura para nuevos usos, evitando la demolición.
- 3-En tercera instancia, ante casos de demolición inminente, que los componentes puedan reutilizarse, posibilitado por diseños de unión y compatibilidad dimensional.

Cada uno de estos problemas corresponde potencialmente a una estrategia de reducción por diseño; En el caso del primer problema, responde a la reducción de masa por medio de optimización estructural siendo este el centro de la investigación, en el caso del segundo problema responde a la flexibilidad programática posible en la forma en que se disponen los componentes, y el tercer problema responde al diseño para desensamblado como alternativa a la demolición. En un ejercicio de síntesis se decide incorporar los tres al mismo tiempo a la hora de diseñar y son recogidos en la tipología estructural seleccionada, que esta investigación denominará grilla 8x8.

La grilla 8x8 es una tipología estructural basada en la observación de una tendencia en el recurrente dimensionado de estructuras con ejes de pilares modulados cada 8 o 6 metros, que obedece a la búsqueda del mercado por maximizar el número estacionamientos al implementar luces entre pilares que son múltiplo del ancho mínimo de lote de estacionamiento tipificado por normativa (5x2,5m) generando luces de 7,5 y 5,5 metros, disponiendo por tanto ejes cada 8 y 6 metros.

Este fenómeno ha sido identificado en múltiples ocasiones y en variedad de escalas y programas como oficinas de planta libre, supermercados, hospitales, stripcenters, edificios corporativos, edificios públicos, malls y núcleos de uso mixto.

Esta investigación explora la hipótesis de que la repetición de esta tipología es un recurso a explotar, al identificarla como una forma implícita de coordinación dimensional que recrea un mismo escenario de dimensiones, tipos de apoyo y carga repetido múltiples veces tanto dentro de un mismo proyecto como en múltiples proyectos dentro del parque construido, abriendo la posibilidad de optimizar el diseño de sus componentes respecto a su geometría ortogonal actual y sus métodos de producción respecto a la construcción tradicional en obra.

¹ Banco Central (2012). Aporte promedio 2008-2011 del sector de la construcción al PIB, series actividad económica.

² INE (2012). Ocupación por rama de actividad económica nacional.

³ MMA (2012) Informe Estado del Medio Ambiente

⁴ CONAMA (2010). Primer reporte del manejo de residuos sólidos en Chile. p.4.

Fuentes compiladas en MOP, MINVU, MMA (2013) Estrategia nacional de construcción Sustentable

⁵ Informe Final: Consultoría estudio Construye 2025 “Caracterización de residuos de la construcción, 1º etapa: Desarrollo, validación y calibración de metodología, aplicado a casos piloto” Grupo de trabajo CITEC U. Bío Bío 2017 p.16

En la búsqueda de una forma estructural eficiente en su relación de resistencia/Masa se hará uso de la metodología de optimización topológica, que es una herramienta matemática que informa dentro de un escenario de dimensiones, apoyos y cargas la geometría teórica más eficiente, extrayendo masa donde esta menos aporta al desempeño estructural del componente, En la discusión académica este tipo de ejercicios suelen estar reunidos bajo un formato de viga llamado “MBB *Beam*”⁶ situando en un mismo plano comparativo exploraciones de diversos autores⁷ y propias que se pondrán a prueba en entornos digitales y físicos.

Se problematiza la forma actual de construir en hormigón, basado en estructuras monolíticas vaciadas in situ por cuanto el producto final de su demolición son toneladas de escombros, aportando al 79%⁵ del total nacional de residuos de construcción anteriormente mencionado. Por el contrario, un diseño de obra gruesa basado en componentes discretos permite una demolición cuyo resultado final son toneladas de componentes con la capacidad de ser reutilizados si su compatibilidad dimensional y diseño de unión así lo permiten, conforme a una economía circular. Ello es facilitado por la identificación de la tipología 8x8 e investigaciones de autores² en el diseño de uniones impermanentes.

Finalmente, así como el hormigón compone gran parte del problema de residuos, se propone que puede contener en sus mismas características parte de la solución. Por su plasticidad, es capaz de adoptar geometrías complejas y eficientes que permiten disminuir su masa. Sin embargo, ni la construcción tradicional ni la industria nacional de prefabricado aprovechan hoy esta cualidad sino que hacen uso de geometrías ortogonales o extrusiones de perfiles simples. En el otro extremo del espectro, ejercicios e investigaciones que sí depuran la geometría estructural a nivel de componente utilizan métodos sofisticados como la impresión 3D más próximos al prototipado que a la producción en masa. Se reconoce en la intersección de ambos casos un nicho en el que la investigación se puede insertar, sofisticando la geometría del componente, pero simplificando su fabricación, conforme a la capacidad instalada de la industria, aprovechando la plástica del hormigón como medio para la producción en masa de componentes de geometría compleja.

Los resultados últimos de la investigación son geometrías específicas de vigas las cuales fueron manufacturadas e insertadas en la etapa proyectual, el sistema estructural que conforman incide directamente en el proyecto de arquitectura en que su propuesta espacial está ligada estrechamente a su dimensión estructural y constructiva, que en su lógica de grilla es capaz de contener tanto unidades de lleno como de vacío, que se pueden permutar para armar diferentes espacialidades y conciliar diversos programas bajo un mismo diseño estructural.

Ante ello, la elección de un núcleo de equipamiento propone como reto conciliar estructuralmente diversos programas y ser adaptable a cambios de uso y evolución en el tiempo.

La inserción del proyecto en la comuna de Maipú, en constante crecimiento demográfico, explota la capacidad del sistema estructural de hacer crecer el proyecto conforme a la densificación de su contexto. El mismo diseño de unión que permite recuperar y reutilizar componentes puede también permitir cambios en etapas intermedias del ciclo de vida del edificio, en oposición a la tendencia actual de construir y diseñar una sola vez para luego ser demolidos una vez el edificio deja de ser rentable o que obsoleto ante su nueva constructibilidad o altura permitida.

6 “MBB Beam:

viga de proporción 1:6 con apoyos simples en sus extremos y carga central. (Messerschmitt-Bölkow-Blohm)

7 “Autores:

Oded Amir, Emad Shakour, Anders Clausen, P. Dorembowsky

Discusión Bibliográfica:

H.A prefabricado: Su geometría, dimensiones y ensambles como estrategias de reducción

El diseño estructural puede ser comprendido desde múltiples parámetros, como sus dimensiones, morfología, tipos de unión, desempeño estructural, fabricación y flexibilidad programática. Y cada uno de ellos puede ser optimizado por sí solo como estrategia de reducción de residuos. Serán abordados en la investigación por cuanto una estructura inevitablemente tiene forma, dimensiones y ensambles. Si bien hay avances importantes desde diversos frentes y disciplinas en cada uno de estos parámetros, cada investigación suele optimizar un parámetro específico dejando de lado los demás.

La discusión bibliográfica más que enfrentar autores busca situarlos en un mismo plano, al reconocer que cada parámetro de diseño estructural no está aislado sino que es co-dependiente respecto a los demás y entre todos pueden describir la imagen completa de un sistema constructivo. En esta línea se plantea que la geometría de un componente puede recoger tanto su comportamiento frente a cargas como su diseño de unión, método de fabricación y dimensiones, pero para resolverlos bajo una misma geometría debe levantar cada rasgo de su forma desde fuentes aisladas.

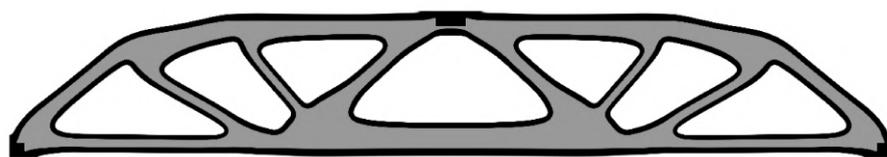
2.1) Optimización estructural desde geometrías complejas:

Investigaciones dirigidas en el ETH de Zurich⁸ buscan generar estructuras equivalentes a las convencionales pero haciendo uso de menos masa (hasta 70% menos) bajo la idea de “resistencia a través de la geometría, no el material” usando herramientas digitales de diseño bajo optimización topológica. Este proceso genera las conexiones y geometría teórica óptima dada ciertas restricciones o *constraints* como dimensiones generales, magnitud, ubicación de las cargas y apoyos. Para resolverla, sin embargo a la hora de llevar esas geometrías virtuales a un plano real su proceso de fabricación es sofisticado y complejo en comparación a la realidad chilena, más próxima a lógicas de prototipado que a la producción masiva.

Existe una estrecha relación entre el concepto de optimización topológica y la Impresión 3D que esta investigación busca desafiar. Suele asociarse la complejidad formal de la optimización topológica con geometrías que son solo posibles de manufacturar por medio de impresión 3D al incorporar cavidades interiores o múltiples trabéculas de espesores menores, ante ello es también un ejercicio de depuración geométrica de esta investigación lograr que la volumetría sea manufacturable por medios de producción masiva como el moldaje, que aprovechando la plástica del hormigón puede dotar a un componente de complejidad formal con la misma facilidad que logra geometrías ortogonales en moldajes simples. Para ello recoge principios bidimensionales de ejercicios de optimización topológica (O.T) propios y de otros autores cuya interpretación tridimensional no es una extrusión directa sino que posee rasgos que facilitan el desmoldaje al incorporar superficies inclinadas y curvas.

⁸ 3D-Printed Stay-in-Place Formwork for Topologically Optimized Concrete Slabs
Andrei Jipa

A pesar del enunciado inicial de la Optimización Topológica de hallar la geometría teórica más eficiente, ante un mismo problema de cargas y apoyos diferentes investigadores llegan a diferentes resultados, por lo que a los ejercicios propios de optimización topológica se sumarán exploraciones hechas por Anders Clausen⁹ de la universidad de Aarhus, P. Dombrowsky y A. Søndergaard¹⁰ de la universidad técnica de Dinamarca y Oded Amir y Emad Shakour¹¹ del Instituto tecnológico de Israel (Technion) investigaciones que si bien toman diferentes estrategias y algoritmos, tienen como lenguaje común la tipología MBB de viga, buscando en todos los casos la disminución de masa. Dichas vigas serán simuladas y construidas para ser puestas a prueba.



⁹ Exploiting Additive Manufacturing Infill in Topology Optimization for Improved Buckling Load
Anders Clausen, Niels Aage,

¹⁰ Three-dimensional topology optimisation in architectural and structural design of concrete structures,
P. Dombrowsky
A. Søndergaard

¹¹ Simultaneous shape and topology optimization of prestressed concrete beams
Oded Amir
Emad Shakour

Arriba:

Viga MBB desarrollada por Anders Clausen, DTU

Abajo:

Vigas desarrolladas por Oded Amir y Emad Shkour para componentes pretensados, incrementando en cada caso la tensión

¹² ISO 1791:1983
Building construction and Modular co-ordination
Definiciones 1 y 2

<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:1791:ed-2:v1:en>

¹³ Precast concrete in Architecture
AEJ Morris 1962

$T_{pre} = 0.6 \times T_{STD}$	ϕ $f_{ext}^T u_{ext}$ $f_{ext}^T u_{pre}$	8.1490e+03 204.6562 -114.3846	
$T_{pre} = 0.8 \times T_{STD}$	ϕ $f_{ext}^T u_{ext}$ $f_{ext}^T u_{pre}$	2.9178e+03 211.6173 -157.6005	
$T_{pre} = 1.0 \times T_{STD}$	ϕ $f_{ext}^T u_{ext}$ $f_{ext}^T u_{pre}$	2.0800e+02 213.1219 -198.6995	
$T_{pre} = 1.2 \times T_{STD}$	ϕ $f_{ext}^T u_{ext}$ $f_{ext}^T u_{pre}$	4.9464e-05 222.6423 -222.6353	
$T_{pre} = 1.4 \times T_{STD}$	ϕ $f_{ext}^T u_{ext}$ $f_{ext}^T u_{pre}$	1.0854e-04 251.9399 -251.9295	

2.2) Coordinación dimensional: Tipología 8x8

La ISO define la coordinación dimensional de la siguiente manera:

“Una convención en relación a los tamaños para la coordinación de dimensiones de componentes constructivos e incorporación a edificios para su diseño, manufactura y ensamblado con el propósito de ensamblar componentes in situ sin necesidad de cortar y permitir la intercambiabilidad de diferentes componentes.”¹² Seguida de esta definición, define la coordinación modular de la siguiente manera: “Un tipo de coordinación dimensional implicando un módulo base o multimódulo, **con el propósito de reducir la variedad de tamaños de componentes producidos** y permitir al diseñador mayor flexibilidad en la disposición de componentes”¹².

En la misma línea, A.E.J Morris sugiere que “El problema esencial de la producción estructural en serie es el gran número de variaciones que puede existir, por lo que encontrar una geometría común es desafiante”¹³.

Existió a lo largo del siglo XX una fuerte voluntad por prefabricar, depositando en la industria la esperanza de poder suplir la gran demanda de vivienda producto del crecimiento demográfico, migración campo-ciudad y posguerra, sin embargo esto muchas veces significó limitar las variaciones de diseño, ya que respondía esencialmente a lógicas productivas y cuantitativas.

En entrevista a Pedro Alonso sobre teoría general de sistemas prefabricados de hormigón¹⁴ se hacía mención a instancias históricas en que algunas naciones socialistas de Europa del este estaban logrando una coordinación dimensional en la industria de la construcción con el fin de maximizar la producción, sin embargo esto era posible solo mediante un gran esfuerzo en economías centralizadas y planeadas por el estado.

En Chile, sin embargo, la grilla 8x8 como fenómeno de coordinación dimensional implícito ha sido generado de forma espontánea y sin el planeamiento de algún organismo o ente estatal coordinador, sino que haya su origen en las propias dinámicas de mercado condicionadas por la normativa. Abriendo la oportunidad de producir en masa una misma pieza optimizada capaz de conciliar múltiples estructuras en el país.

Su amplia aplicación en multiplicidad de programas y escalas cumple con el criterio descrito por el instituto de tecnología de la construcción de Cataluña “La mejor coordinación dimensional deber ser lo suficientemente flexible para poder ser aplicada en prácticamente cualquier edificio, en el grado necesario y según las exigencias y capacidades de los agentes implicados”¹⁵.

En este apartado también destaca el ente gubernamental británico *construction platforms research centre* encabezado por Jaimie Johnston¹⁶ que se centra en dos de los parámetros a considerar, por una parte en la tipificación de morfologías de edificios en pos de optimizar su producción y por otro en la generación de las denominadas estructuras o plataformas abiertas, permitiendo cierta flexibilidad por diseño dentro de su lógica estandarizada. Hace el ejercicio de levantar y medir todas las edificaciones gubernamentales construidas en el Reino Unido durante los últimos años para luego desde ellas descomponerlas a sus piezas elementales manufacturables y optimizables, creando una serie de “kit de partes” en que cada pieza está prefabricada y precalculada (*pre engineered*).

Así genera diferentes chasis o plataformas según el programa (plattform 1 para cárceles y residencias, plattform 2 para escuelas y edificios administrativos, plattform 3 para Oficinas de planta libre y hospitales, etc) desde las cuales se desarrollan proyectos únicos o específicos a su lugar, similar a como diferentes modelos de autos comparten su chasis, plataforma y repuestos. sin embargo hace uso de métodos de construcción in situ altamente sofisticados como robots que bombean hormigón o inteligencia artificial que programa las faenas en un entorno BIM, además de basar las plataformas en materiales de gran energía incorporada como aluminio y acero en sus vigas, bases de losa y pilares. Al ser una producción centralizada posee aún más energía embebida por transporte. Agravando innecesariamente el impacto medioambiental en su huella de carbono y energía embebida, según los principios fundamentales de análisis de ciclo de vida indicados por Meg Calkins en *Materials for Sustainable Sites*¹⁷.

¹⁴Entrevista con Pedro Alonso, Investigador de sistemas prefabricados de Hormigón. P. Universidad Católica 4 Nov 2019

¹⁵ “Proyectar arquitectura desde la coordinación dimensional” Instituto de tecnología de la construcción de Cataluña.

¹⁶ Platforms Bridging the gap between construction + manufacturing Jaimie Johnston, Bryden Wood

¹⁷ Materials for sustainable sites Meg Calkins



2.3) Producción: Industria nacional de prefabricados y capacidad instalada

Existe en Chile una trayectoria en la prefabricación de hormigón, así como una evolución en el mercado que ha cambiado desde la producción de sistemas constructivos como el sistema Depetris, Inapreco, y KPD, hacia un segmento dedicado a la venta de componentes tipificados y masificables como soleras, tubos/cajones de desagüe, postes de luz, panderetas, etc.

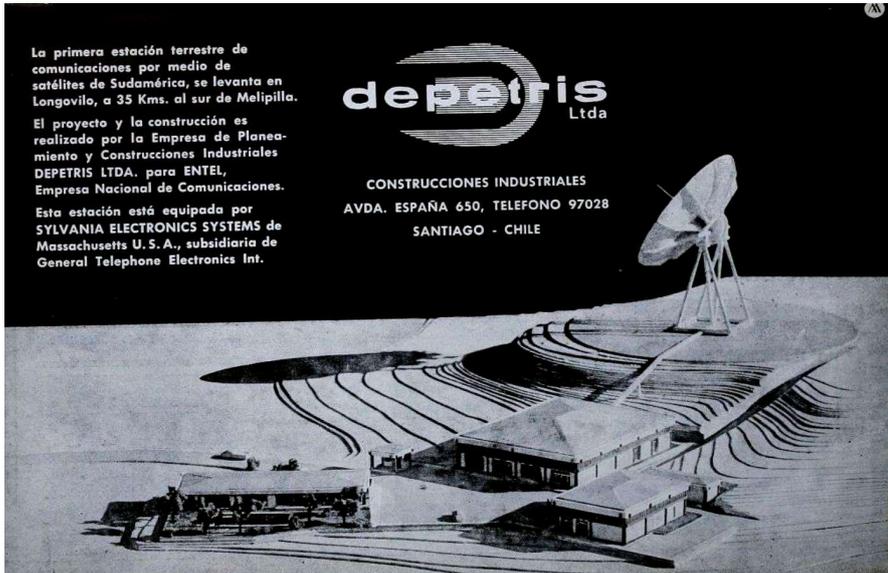
Arriba:

Plattform 1, correspondiente a obra gruesa de escuelas, con una grilla de 4x10,5 metros

Abajo:

Sistema KPD en construcción
Fuente: Andrés Brignardello





Lo anterior responde posiblemente a un cambio de intereses y de modelos económicos, anteriormente enfocado a la industria como respuesta a necesidades sociales de vivienda en un modelo económico centralizado y actualmente a un modelo económico enfocado en el sector privado que busca maximizar retornos por medio de la producción masiva de elementos de alta demanda que la misma normativa tipifica, permitiendo su fabricación en masa

Postes

Fabricamos más de 30 mil postes al año, en diferentes alturas, que van desde los 4 hasta los 18 metros. Este producto puede ser utilizado tanto por distribuidoras eléctricas como por empresas mineras y el mundo agrícola.



Postes CGE:	Postes Chilectra:	Postes CGE – Endesa:	Postes Endesa:	Postes Chilectra – CTC:
6 m/200 Kg	4.3 m/1550 Kg	13.5 m/700 Kg	8.7 m/250 Kg	7.8 m/800 Kg
6.8 m/875 Kg	7.2 m/530 Kg	13.5 m/1000 Kg	8.7 m/350 Kg	
8 m/200 kg	7.2 m/1150 Kg	15 m/800 Kg	10 m/350 Kg	
9 m/420 kg	8.7 m/394 Kg	15 m/1600 Kg	10 m/600 Kg	
9.5 m	10 m/394 Kg	16.5 m/900 Kg	11.5 m/350 Kg	
10 m/385 Kg	11.5 m/525 Kg	18 m/1000 Kg	11.5 m/ 600 Kg	
11.5 m/440 Kg		18 m/1600 Kg		

Arriba:
 Afiche publicitario Depetris
 Revista CA 1969

De las 40 empresas nacionales de prefabricado de hormigón, 37 enfocan parte de su producción a la permanente manufactura de estos componentes y solo 14 dedican parte de su producción a la fabricación de elementos constructivos, sin embargo ninguna recoge en su catálogo el fenómeno de 8x8 mencionado anteriormente, de hecho, el modelo de negocios de la fabricación de elementos constructivos difiere al de la fabricación de componentes tipificados en que no suele guardar stock o escalar su producción, sino que es a pedido, siendo cada uno un nuevo proyecto de diseño para el fabricante bajo algunos parámetros fijos, como la sección de los elementos y límites dimensionales de las máquinas utilizadas, obstaculizando en la variedad de diseños estructurales de cada edificio una economía de escala respecto a la fabricación de componentes.

Abajo:
 Empresa HORNOR y su producción a gran escala de postes de luz sobre las 30.000 unidades al año, junto a la tipificación de sus dimensiones. Sucede algo similar con las soleras tipificadas por Ser-viu, cajones de alcantari-lado, etc.

Fuente:
<http://www.hornor.cl/>

Derecha:

Total de empresas nacionales dedicadas al hormigón prefabricado, incluyen por lo general mobiliario público, instalaciones, postes de luz, canaletas, cajas y tubos de desagüe, etc

Elaboración propia



La gran excepción a esta tendencia es **Hormipret**, la empresa de mayor volumen de producción en el país, dedicada en parte a la elaboración de losas y viguetas pretensadas tipificadas y en stock, hallando en el mercado inmobiliario de viviendas unifamiliares un segmento que permite la demanda y producción seriada de elementos constructivos. Esta empresa fue una de las dos levantadas mediante visitas a terreno y entrevistas a jefes de planta, junto a **Preansa**, filial chilena de la empresa de prefabricado española Prainsa, la cual fue de interés en esta investigación al tener la mayor capacidad instalada del país y un modelo de negocios diametralmente opuesto al de Hormipret; La fabricación de piezas altamente especializadas, como pasos bajo nivel, naves industriales de grandes luces y puentes, asociando servicios a la venta de componentes como la asesoría en etapas de diseño, cálculo estructural, gestión y transporte.

La prefabricación e industrialización de la construcción se alinea con intereses gubernamentales de producción y sustentabilidad¹⁸ en que la rentabilidad del sector de la construcción descansaría en la serialidad y capacidad productiva de la industria, con el potencial de asumir desafíos como sofisticar componentes y la creación de valor añadido e innovación, que contrasta ante el panorama actual de la construcción en Chile cuya rentabilidad descanza en la implementación de mano de obra de bajo costo con una alta tasa de informalidad¹⁹ bajo métodos tradicionales y velocidad de construcción con impactos en la calidad final.

Ante la gran escala de la problemática ambiental del sector de la construcción, sería deseable una respuesta también a gran escala o escalable; La industrialización mediante coordinación dimensional permitiría aplicar las exploraciones de geometrías complejas y eficientes al mayor número de metros cuadrados posibles y su propuesta desde componentes se insertaría en el paradigma actual de la industria nacional de prefabricado de forma que esta recogiese en su producción una mayor cuota de la demanda de metros construidos.

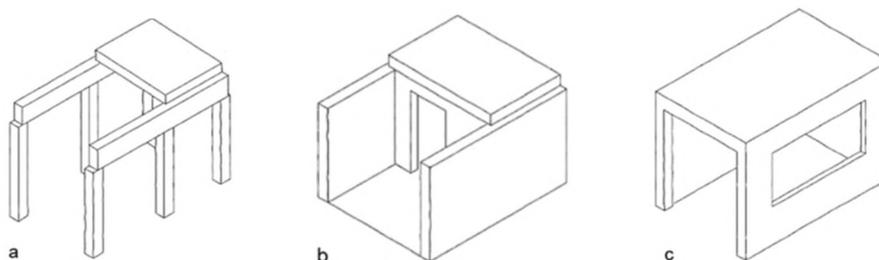
¹⁸ Construye 2025: Iniciativa de Industrialización y prefabricación Programa estratégico nacional de productividad y construcción sustentable

¹⁹ Programa de Emprendimiento Emergente: Medidas para facilitar la transición de la economía informal a economía formal.

2.4) Estructura abierta: Tipología 8x8

Juan Ignacio Baixas en *Emergencia y permanencia*²⁰ cita a Gerald Staib en *Components and systems*²¹ en su clasificación general de sistemas prefabricados entre sistemas basados en marcos, basados en paneles y basados en módulos espaciales, afirmando que "...En términos de flexibilidad (de conformación espacial), el sistema de marcos es el que da mayores libertades, seguido de los paneles y luego de los módulos..."

En esta línea, la tipología 8x8 cumple por si sola con otro de los criterios de diseño para reducción al permitir la flexibilidad programática, al ser una tipología de marcos rígidos con mínima intervención en planta respecto a la definición permanente de espacios y como un mismo diseño estructural es capaz de conciliar multiplicidad de programas como supermercados, hospitales, oficinas, etc. No solo hablando de la difusión de la tipología sino también de su potencial adaptación entre usos.



N. John Habraken acuña el concepto de "open building" en *Supports: An Alternative to Mass Housing*²², explicando cómo el diseño estructural al ser permanente debe disponerse de tal forma que permita cambios y modificaciones a lo largo del ciclo de vida del edificio, bajo estas ideas, se propone a la planta libre basada en pilares como la más neutra y flexible en el tiempo capaz de acoger en su morfología diversos cambios programáticos por medio de particiones impermanentes y no estructurales como tabiquerías.

"We should not forecast what will happen, but try to make provisions for the unforeseen"²² Sin embargo Habraken hace clara distinción en que una edificio abierto no necesariamente implica una planta libre como la *maison dominó* de Le Corbusier, sino que puede hacer uso de estrategias como la "Malla tartán" mediante la modulación de dimensiones en tipologías de muro, en relación a ideas de coordinación modular.

Existe un tipo de flexibilidad por diseño que no es espacial sino de instalaciones, ante ello, se toma como referente el sistema constructivo desarrollado por Louis Kahn para el Richards medical research centre, que en un ejercicio de síntesis combina bajo un solo diseño de componente criterios de optimización Estructural, flexibilidad espacial y programática al permitir grandes luces ininterrumpidas y contener el paso de densas instalaciones correspondientes a un programa de laboratorio de investigación entre los mismos cuerpos estructurales y permitir modificaciones. Se ha hecho una reconstrucción 3D de este sistema basado en planimetría, del que se han tomado lecciones:

- 1- Optimización estructural al separar con la mayor distancia posible los momentos flectores de compresión y tracción de la viga, dejando espacios vacíos entre ellos.

Derecha:

Esquemas de las tres categorías de sistema constructivo ordenadas de más a la menos flexible a) Marcos b) Paneles y c) Módulos

Fuente:

Components and systems.
Gerald Staib (Pag 42)

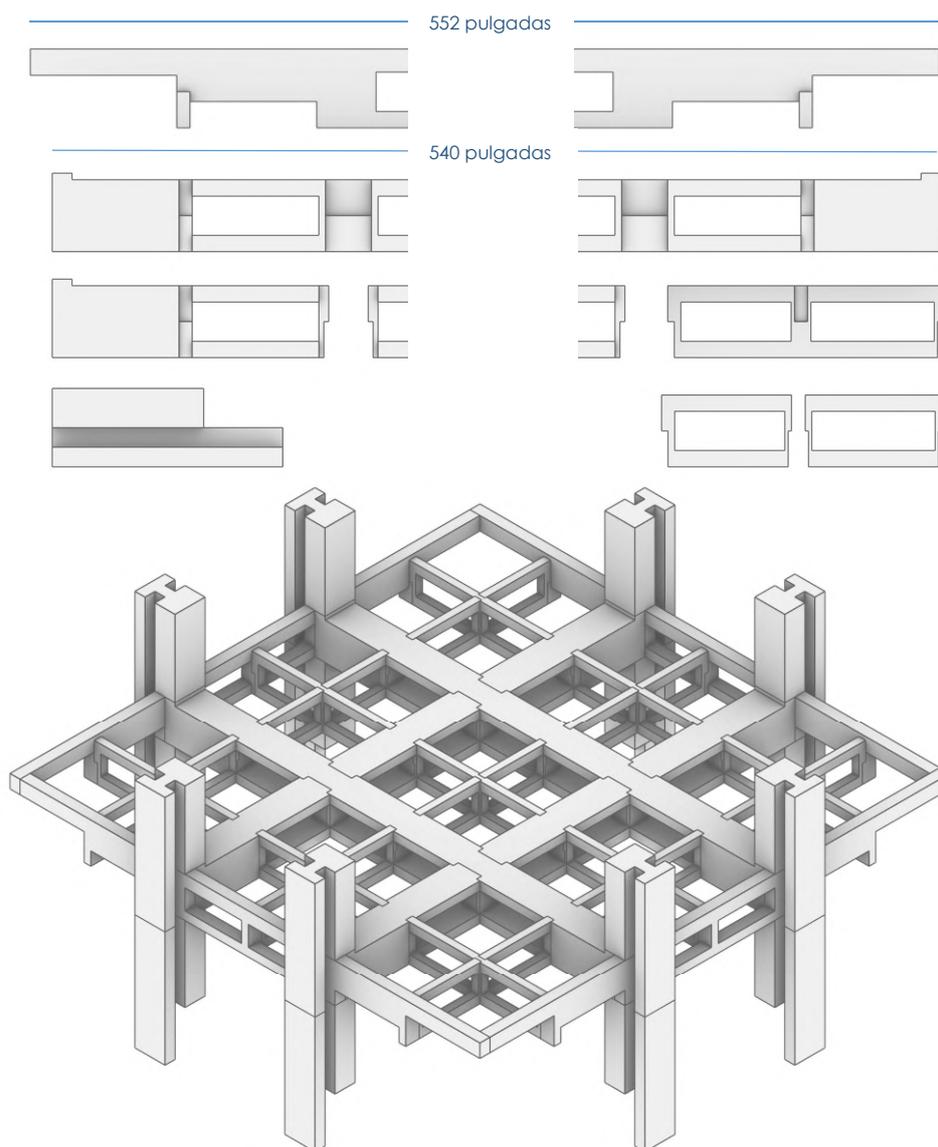
²⁰ Emergencia y permanencia
Juan Ignacio Baixas
John Saffery Gubbins

²¹ Components and Systems
Gerald Staib
Andreas Dorrhofer
Markus J. Rosenthal

²² Supports: An alternative to mass housing

N. John Habraken, 1961

- 2- Comunicación de ambos bordes de la viga por trabéculas verticales similar a un esquema Vierendel, dejando grandes vanos para pasar instalaciones.
- 3- Instalaciones expuestas y soportadas por las mismas vigas, los mismos vanos que aligeran la viga permiten el paso y contención de instalaciones.
- 4- Meticuloso diseño de carpinterías de hormigón, en que se contienen canterías y sus dimensiones responden a las cargas a la que se somete el elemento.



2.5) Diseño para desensamblado:

Arriba:

Reconstrucción 3D de sistema constructivo para el Richards Medical Research centre de Louis Kahn + Piezas que conforman el sistema

Elaboración Propia

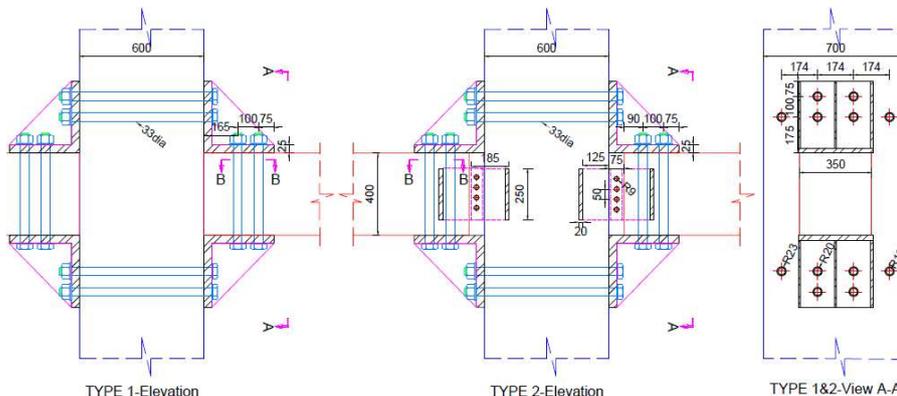
Se conoce como *Design for deconstruction*, un principio de diseño sustentable que propone diseñar con la eventual demolición del inmueble en mente posibilitando la reutilización de las partes así como una disminución en la generación de residuos, al entender el edificio dentro de un marco de economía circular, reconociendo la gran cantidad de masa y energía contenida en las estructuras actuales.

Dentro de las estrategias para DFD la noción de descomponer la estructura total en componentes exige el diseño de uniones impermanentes, citando a Chriss Morgan y Fionn Stevenson, autores de *Design for deconstruction: design guides*²³

“The design of connections is arguably the single most important aspect of designing for deconstruction. The type of connection used between construction elements will determine whether or not it can be successfully deconstructed”.

La prefabricación de hormigón existente hoy en el país y mayoritariamente en el mundo está planteada desde uniones permanentes que simulan una construcción monolítica convencional, armando entre componentes una cavidad que en obra es consolidada por hormigón, de forma que explota la rapidez de montaje de la prefabricación, pero en términos de la futura demolición de la estructura es igual de problemático que una estructura monolítica o incluso más complejo en el caso de incorporar piezas pretensadas. Ante ello se plantea incorporar uniones de carácter impermanente que permitan recuperar los componentes, de forma que el ciclo de vida de cada pieza pueda extenderse más allá del ciclo del edificio, disminuyendo el output de residuos y la extracción de nuevos recursos.

Dada la complejidad de diseñar uniones y la serie de problemáticas que se debe resolver, este apartado descansa en el diseño propuesto por otros autores, destaca la propuesta de P.K. Aninthaneni y R.P Dhakal de la Universidad de Canterbury²⁴, estudio dividido en una fase teórica y otra empírica que se centra en la búsqueda de soluciones alternativas para rigidizar las uniones entre elementos de edificios de marcos rígidos prefabricados, que proliferaron en Nueva Zelanda desde la década de los 80's ya que al ser un país sísmico, muchas de las uniones de los proyectos iniciales comenzaron a presentar problemas, dado los esfuerzos horizontales a los que se exponía dicha unión, la solución típica a dicho problema es un diseño de unión que constructivamente emula el nudo de un edificio monolítico, la misma solución bajo sutiles variaciones se utiliza en la mayoría de países sísmicos, sin embargo los autores proponen una variación con propiedades mecánicas similares, con los beneficios de la deformación lineal del acero y abrir la oportunidad al desensamblado, sin embargo el resto de parámetros, como la geometría de los componentes del sistema no están optimizados.



²³Design for deconstruction: design guides
Fionn Stevenson
Chris Morgan
2004

²⁴Conceptual development: Low loss precast concrete frame building system with steel connections
R.P Dhakal
P.K Aninthaneni

Cada uno de los parámetros estructurales mencionados del punto 2.1 al 2.5 representa un criterio a optimizar en sí mismos, sin embargo al plantearlos todos juntos se pueden identificar relaciones entre sí. Por ejemplo, en la influencia que una tipificación dimensional (2.2) tiene sobre los métodos productivos (2.3) y la posibilidad de depurar componentes y procesos en entornos industriales (2.3) con el estudio de geometrías eficientes por medio de optimización topológica (2.1), centro de esta investigación.

Ante ello la pregunta e hipótesis se plantearán desde la articulación de estos parámetros y su pertinencia como estrategias de reducción de residuos por diseño.

Pregunta e hipótesis

Ante las tendencias actuales de diseño estructural y la capacidad instalada de la industria local hacia una construcción en hormigón más sustentable, ¿cómo pueden los componentes de hormigón reducir la cantidad de masa de obra gruesa y disminuir de forma significativa residuos, emisiones y recursos durante el ciclo de vida del edificio?.

Se plantea como hipótesis que una posible solución a la reducción de masa yace en la optimización geométrica por medio de herramientas digitales como la optimización topológica. Esto, junto a la integración de otras estrategias de reducción en diferentes momentos de la obra, como la flexibilidad programática y de instalaciones, y la incorporación de uniones impermanentes que inicialmente facilitan la construcción, permiten modificaciones estructurales en edades intermedias del edificio y la recuperación de componentes una vez su ciclo de vida termina, en oposición a la demolición convencional. Estas estrategias son reunidas bajo una sola propuesta sintética, formulada desde el diseño de componentes hacia la morfología 8x8 identificada por la investigación y la producción en centros productivos de prefabricado nacionales.

En la codependencia entre parámetros de diseño estructural se han identificado al menos dos oportunidades: por un lado, la recurrencia constatada de una misma tipología estructural y su coordinación dimensional permiten una demanda con características constantes que facilita la producción en masa. Por otro lado, la producción seriada en entornos industriales ya tiende a la depuración de la geometría de los componentes, y dentro de la depuración de componentes existe la posibilidad de integrar el diseño de uniones impermanentes.

Recapitulando, los frentes de la investigación son en primer lugar la optimización estructural, desarrollada como tema principal en la tesis, seguida de la coordinación dimensional, producción, flexibilidad programática y diseño para desensamblado, que se desarrollarán en la investigación como subtemas de acuerdo a lo detallado a continuación:

Problema	Criterio
Optimización estructural	Optimización topológica
Coordinación dimensional	Grilla estructural común
Producción	Capacidad instalada en la Industria
Flexibilidad programática	Morfología de Planta libre
Demolición/escombros	Desensamblado y reutilización

Objetivos:

La optimización topológica parte de la premisa de hallar la geometría teórica más eficiente, sin embargo diferentes investigadores han llegado a diferentes geometrías, ya sea por variaciones en sus procesos o algoritmos. Se pondrán a prueba investigaciones hechas desde la DTU (Dinamarca), UAarhus (Dinamarca) Technion (Israel) y propias (Chile).

La experimentación desde prototipos tiene como fin poner dichas exploraciones en un mismo plano de comparación digital y físico, con los siguientes objetivos:

Prototipado Digital:

- Conocer cómo se comportan las fuerzas al interior de las vigas y como se transfieren desde las zonas de compresión y tracción
- Conocer que miembros de la viga trabajan a tracción y cuales a compresión.
- Que zona es más crítica (Tensión) para el funcionamiento de la viga
- Cuales son posibles puntos de rotura en los diseños
- Como se deformarían las vigas, identificar patrones
- Cómo se comporta ante cargas homogéneas una viga optimizada para cargas puntuales.
- Que viga posee mejor desempeño en relación a su masa*.

Prototipado Análogo:

- Corroborar la constructibilidad de las geometrías mediante moldes, y que rasgos en el diseño facilitan su factura hacia la producción masiva
- Corroborar correlación entre análisis digital y físico ante diferencias en propiedades materiales por separación espacial entre refuerzos de acero y hormigón, diferentes del modelo digital que utiliza un aproximado homogéneo.

Metodología:

La metodología se desglosará en tres actividades principales: Optimización topológica, análisis FEA y la elaboración de prototipos físicos:

Metodología optimización topológica: Dada una volumetría general con dimensiones, propiedades materiales, ubicación/tipos de apoyo y ubicación/magnitudes de cargas, da a conocer la geometría teórica óptima para dicho escenario, removiendo masa de aquellas zonas del elemento que menos aportan a su desempeño estructural. (mayor detalle en P.

Metodología FEA: dada una geometría específica, propiedades materiales, ubicación/tipos de apoyo y ubicación/magnitudes de cargas, da a conocer el comportamiento estructural que tendría dicho elemento, especificando tensiones, desplazamientos y factores de seguridad.

Metodología de prototipo físico: Fabricación en hormigón reforzado de las geometrías de autores y propias mediante moldes laterales fresados en CNC, que simulan el escenario en que las vigas son manufacturadas en líneas de producción nacionales (Moldes laterales vaciados desde arriba)

Abajo:

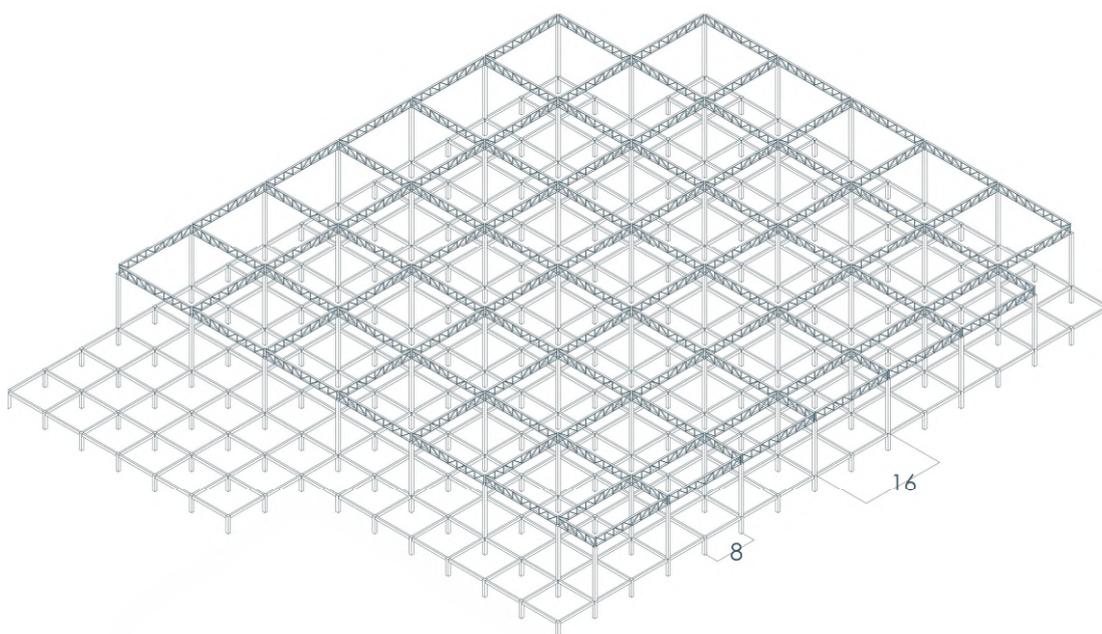
Axonométrica estructural de Homecenter en la comuna de Maipú: Estricta grilla 8x8 en subsuelo que sale a la superficie cada 16m para sostener vigas de cubierta
Elaboración propia

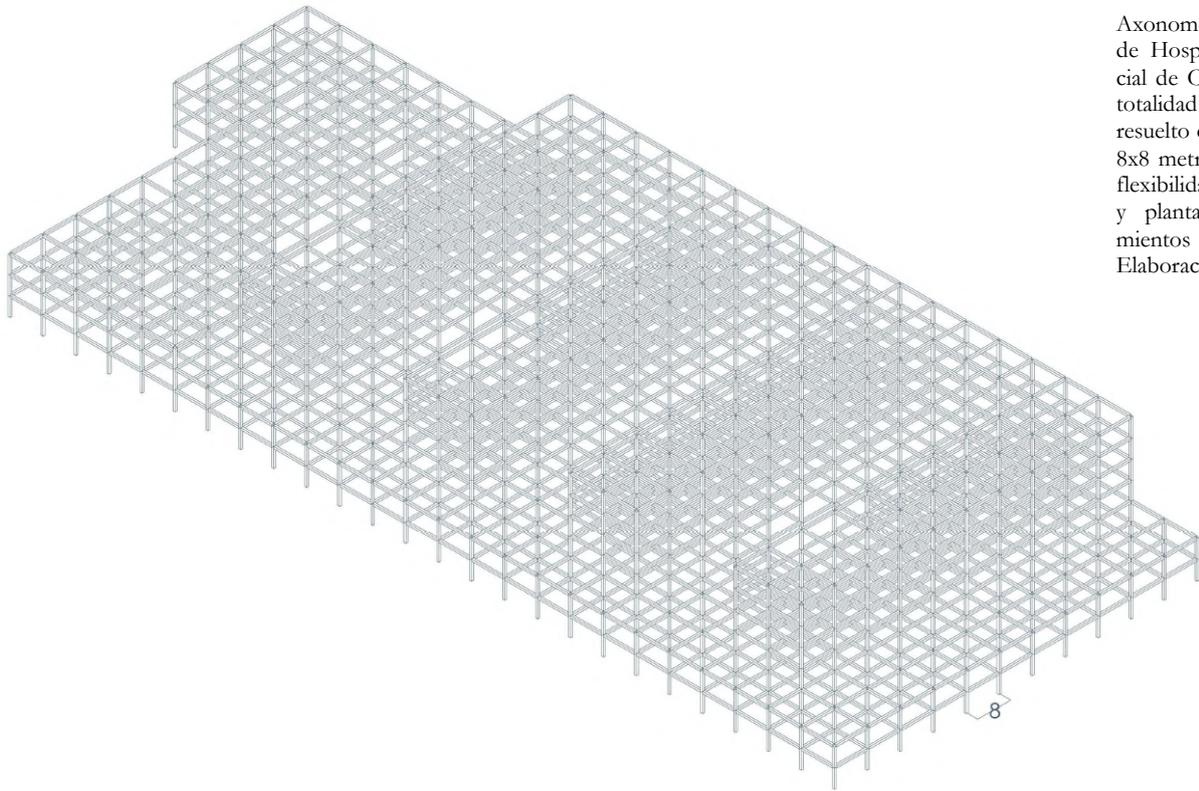
Los ejercicios de optimización topológica logran geometrías tan eficientes como específicas, vale decir, aplicables a un solo escenario, por ello la literatura de O.T suele justificar el esfuerzo de una depuración geométrica en que será aplicado a elementos de gran escala, utilizando como caso base puentes, vigas de grandes luces o pabellones. Esta investigación en cambio, busca justificar la depuración geométrica en la escalabilidad/repetitividad del mismo componente optimizado, que a cambio exige identificar la repetitividad de un mismo escenario de cargas.

En la búsqueda de maximizar el impacto medioambiental de los criterios anteriormente presentados, las exploraciones de geometría estructural se insertarán en la tipología 8x8 identificada por la investigación, ya que es relevante para tres de los criterios mencionados, primeramente es un marco de coordinación dimensional en el que las vigas depuradas pueden insertarse y repetirse múltiples veces tanto dentro del proyecto como en múltiples proyectos, promoviendo la reutilización de las vigas en futuras edificaciones luego de ser recuperadas. La repetición de este mismo diseño posibilitado por la coordinación dimensional de la grilla 8x8 habilita un segundo criterio de producción, que ante una demanda tipificada de componentes permite la producción en masa, conforme a la tendencia actual en la industria de prefabricado. Finalmente la tipología en sí misma cumple con un tercer criterio de flexibilidad programática al no definir recintos con su solución estructural.

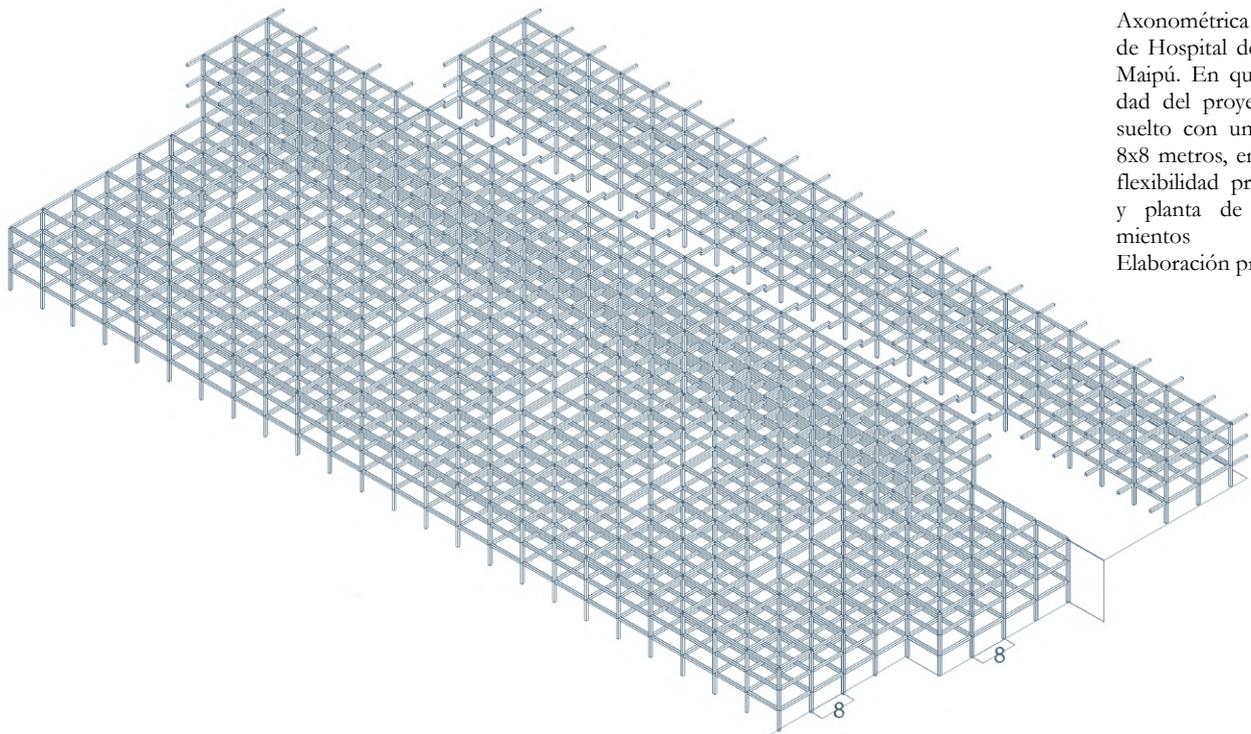
Por otro lado la tipología 8x8 en su forma actual y como existe en el parque construido deja criterios abiertos como oportunidades para mejorar, como la optimización estructural de sus componentes y la incorporación de uniones impermanentes que presentan el desensamblado como alternativa a la demolición.

Además del sistema de dimensiones que presenta la tipología 8x8, su descripción se puede enriquecer más al incorporar otros datos informados por la normativa, que no solo explican en parte su origen sino que especifican cargas y usos, informando el proceso de optimización estructural.





Axonométrica estructural de Hospital interprovincial de Curicó, en que la totalidad del proyecto es resuelto con una grilla de 8x8 metros, en pro de la flexibilidad programática y planta de estacionamientos
Elaboración propia



Axonométrica estructural de Hospital del Carmen, Maipú. En que la totalidad del proyecto es resuelto con una grilla de 8x8 metros, en pro de la flexibilidad programática y planta de estacionamientos
Elaboración propia

La grilla 8x8

Dentro de la temática de reducción de residuos y recursos en la que se enmarca el taller, se ha identificado en la optimización estructural una oportunidad desde el diseño para reducir la cantidad de masa necesaria en una estructura, haciendo uso por tanto de menos recursos.

Gran parte de los casos de optimización topológica aplicados a arquitectura son impulsados por el interés formal de las espacialidades que genera²⁵, sin embargo estos ejercicios tienden a ser demasiado específicos como para aplicar la misma geometría en otras circunstancias y la sofisticación, gasto energético y generación de residuos de sus métodos de fabricación (impresoras 3D, moldajes perdidos, brazos robóticos) suelen opacar los logros de su eficiencia estructural.



²⁵: Smart Slab, ETH Zurich, Utilización de geometría compleja y mínimo material por medio de optimización topológica, integrando en un solo elemento vigas y losas posadas sobre un muro curvo diseñado en un entorno digital y trasladado directamente a medios de fabricación digitales como una impresora 3D de arena a gran escala y brazos robóticos

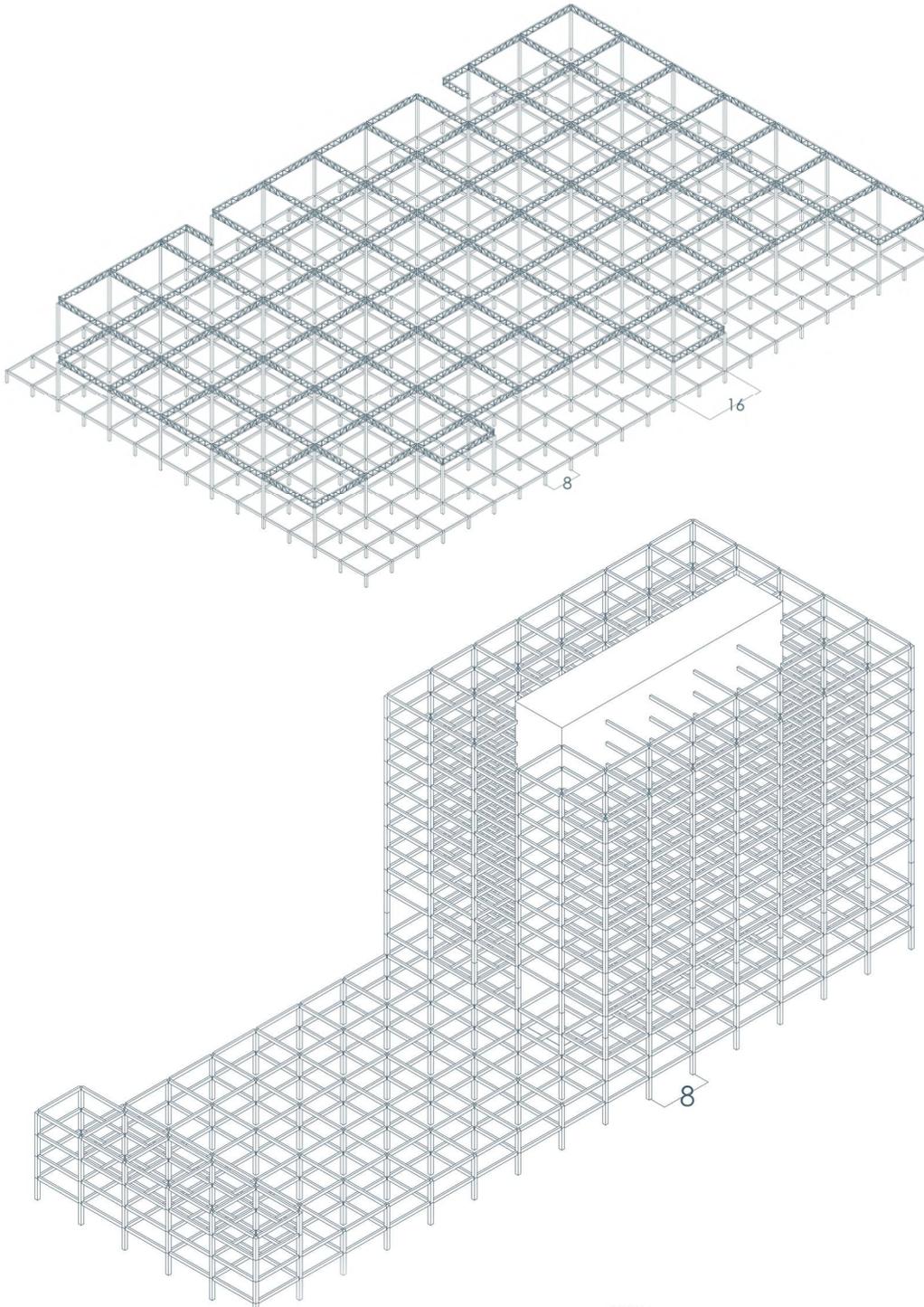
Construcción de un muro de Smart Slab, por medio de un brazo robótico

Fuente:
3D-Printed Formwork for Prefabricated Concrete Slabs

Andrei Jipa
Aghaei Mibodi

Es por esto que se explora la optimización topológica aplicada al diseño de **componentes**, con la capacidad de insertarse en escenarios comunes, replicables y conocidos que permitan justificar en la escala de su demanda y producción los esfuerzos de una búsqueda formal más exhaustiva hacia la eficiencia estructural y el ahorro material.

Dicho escenario común es una tendencia en el diseño estructural del parque construido nacional identificada por esta investigación y propuesta como tipología que se denominará **Grilla 8x8**, la que evaluada a una escala macro se ve repetida múltiples veces en diversas escalas, emplazamientos y programas como oficinas, hospitales, universidades, tiendas de retail, supermercados, edificios corporativos e institucionales.

**Arriba:**

Axonométrica de estructura de Supermercado LIDER en AV Pajaritos 4500: Estricta grilla 8x8 en subsuelo que salen a la superficie cada 16m para sostener vigas de cubierta

Elab propia

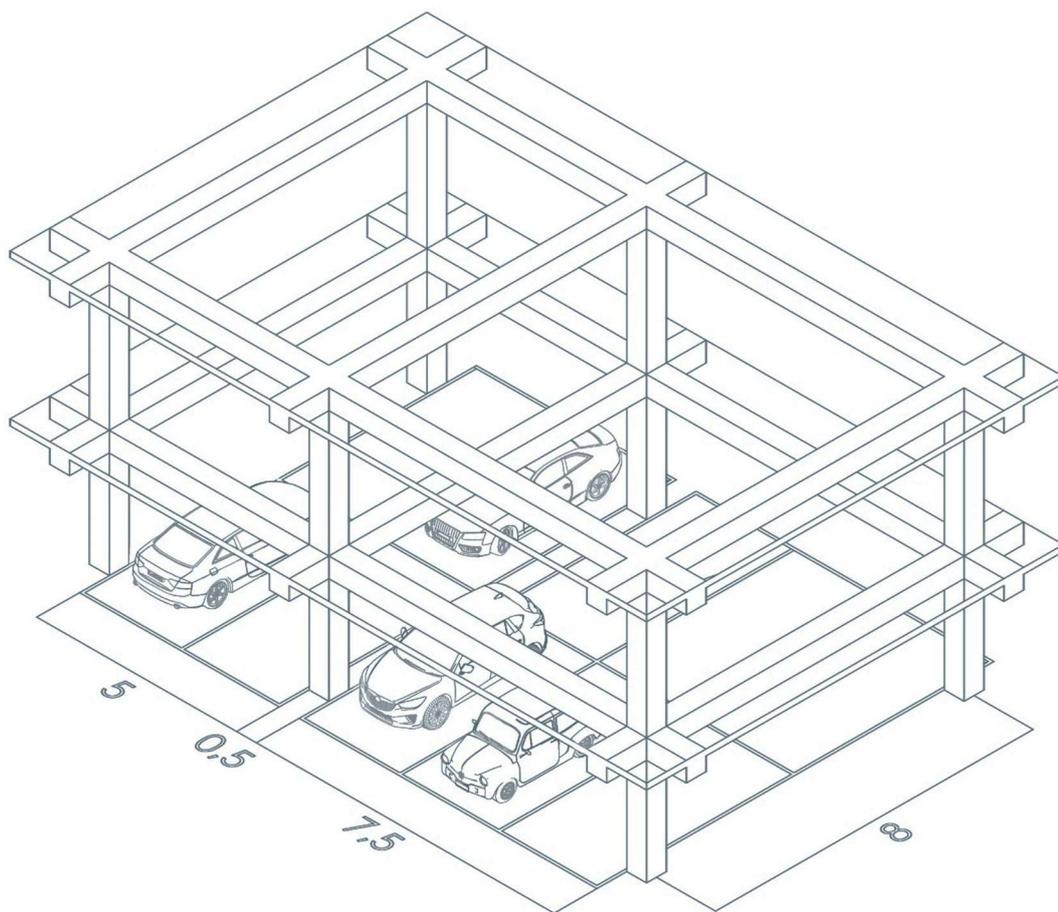
Abajo:

Axonométrica de estructura de Edificio de Oficinas, grilla de 8 metros Edificio Corporativo de Claro, Santiago en El Salto 5450.

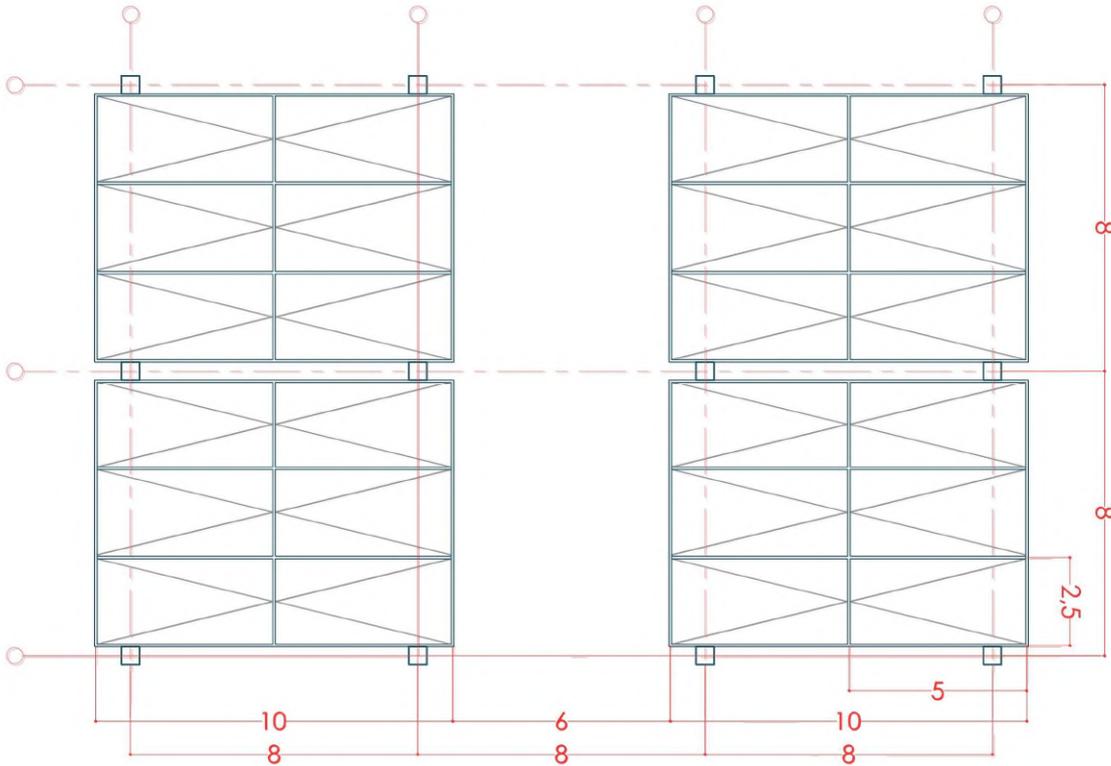
Elab Propia

La **grilla 8x8** consiste en una tipología estructural de marcos rígidos de hormigón con pilares dispuestos en una grilla cuyos ejes se distancian 8 metros, originando luces de 7,5 metros entre pilares. Esta modulación tiene su origen en el diseño de estacionamientos, que conforme al **artículo 2.4.2** de la OGUC dicta dimensiones mínimas de 5 x 2.5 metros por lote, bajo esta restricción la tendencia del mercado ha sido maximizar el número de lotes posibles en las primeras plantas, por lo que dispone los elementos estructurales con luces múltiplo del ancho de un lote de estacionamiento (2,5 metros) que además deben conciliar luces con los espacios en pisos superiores y el ancho de las calles de los mismos estacionamientos, esto genera una tendencia en la modulación de estructuras de hormigón con ejes dispuestos cada 8 y 6 metros en la totalidad del edificio.

*“Los estacionamientos contemplados en un proyecto deberán tener un ancho mínimo de **2,5 m**, un largo no inferior a **5 m** y una altura libre mínima de 2 m bajo vigas o elementos horizontales. Dicho ancho mínimo podrá reducirse hasta en un 10% por elementos estructurales, siempre que no afecte a más de la mitad del largo requerido”.*



Esta investigación propone que la repetición de esta tipología es un recurso a explotar, al identificarla como una forma implícita de coordinación dimensional que recrea un mismo escenario de dimensiones, tipos de apoyo y carga repetido múltiples veces tanto en un mismo proyecto como en múltiples tipos de proyecto dentro del parque construido nacional.

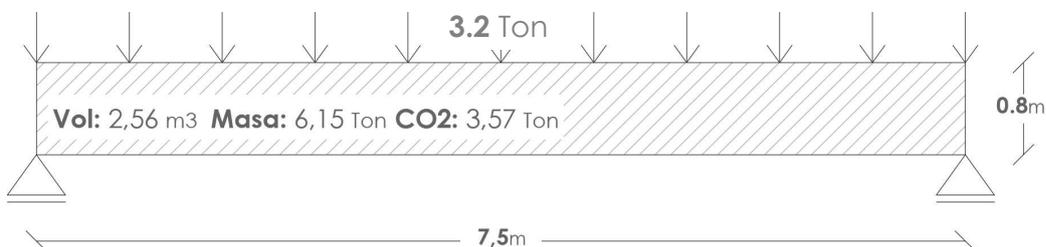


Solo en Santiago se construyeron 766.631 nuevos metros cuadrados de malls durante el año 2017²⁶ Siendo frecuente en este tipo de programa el uso de tipologías de marco rígido modulado en 8x8 metros, lo que equivaldría a 23.957 unidades de 8x8 metros (64m²). Tomando en cuenta que cada unidad de 64m² significa un mínimo de dos vigas y un pilar, representaría un total de 47.914 vigas y 23.957 pilares solo para malls durante el año 2017 en la ciudad de Santiago.

Datos específicos desde el 8x8 hacia la Optimización Topológica.

El **pilar** de hormigón típico en un sistema de marco rígido de 8x8 tiene una sección cuadrada de 50x50 a 70x70 cm y una altura que va de los 3 a 5 metros, arrojando un volumen que va de los 1,47 a los 2,45 m³ de hormigón por pilar, equivalente a 35.216 a 58.695 m³ de hormigón en pilares de mall solo en Santiago durante el 2017, traducibles a **81.000 a 135.000 toneladas de hormigón**, y con una huella de carbono unitaria de 541kg de Co2 por ton de hormigón²⁷, equivale a **78.434 ton de Co2**.

La **viga** de hormigón de 8 metros típica tiene una **luz de 7.5 metros**, una **sección en torno a 80x40** cm y apoyos situados a sus extremos, los que pueden considerarse simples o empotrados según la rigidez de los pilares. Dada sus dimensiones tiene un volumen de 2.56 m³ y una **masa en torno a 6.15 toneladas** (2.4ton/m³ HA reforzado) traducándose a una **huella de carbono de 3.57 ton/viga** solo tomando en cuenta el hormigón, extrapolado a los datos anteriores, corresponde a 282.118 toneladas de hormigón y 163.910 toneladas de CO2 en vigas en malls durante el 2017.



Esta investigación aún no obtiene datos globales de la cantidad de Metros cuadrados construidos bajo esta tipología en el país, por ello ejemplificará con datos conocidos de malls desde los cuales extrapolar información.

²⁶ Georesearch:
www.geo-research.com

²⁷ Hoja de Ruta de la Industria del Cemento en Chile "Hacia una Economía Baja en Carbono".

Arriba:

Principio en planta de disposición de la estructura entre lotes de estacionamiento, que en una grilla de 8x8 ampara 3 lotes por luz y genera una circulación de 6 metros de ancho. Elaboración propia

Abajo:

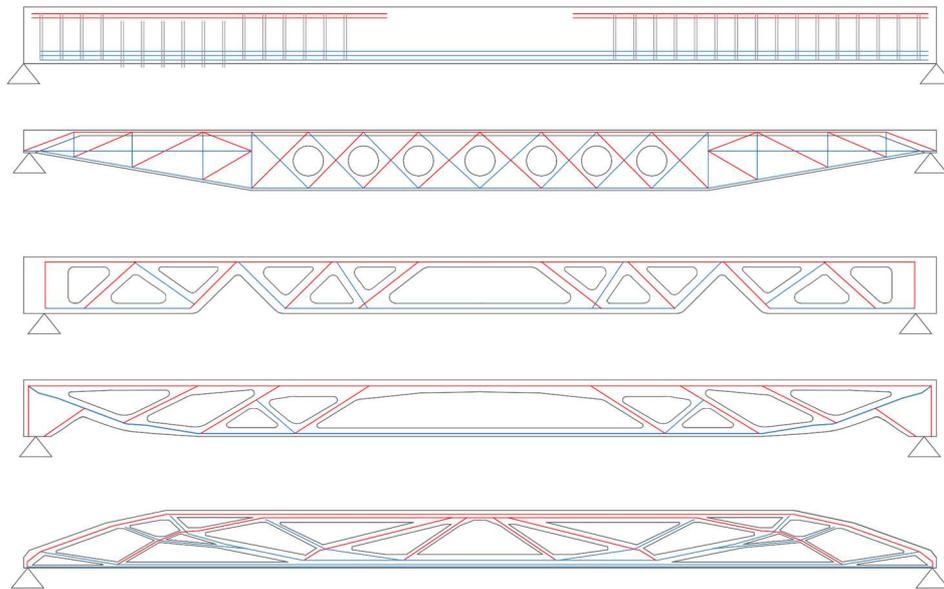
Escenario de cargas de viga de 8 metros típica Diagrama de cuerpo libre con dimensiones comunes, tipos de apoyo y carga.

La carga que dicha viga debe soportar está normada en función del uso según la norma **NCH 1537** de diseño estructural en Chile, la que presenta los valores en KPa (Kilopascal/m² que para efectos de la norma equivale a 100 kgf/m²). A partir de ella se propone una carga de 5Kpa (**500Kg/m²**) ya que abarca gran cantidad de usos y es el límite superior antes de entrar a programas de carácter industrial. Dicha carga en un área tributaria de 64m² (parche de 8x8 metros) es recibida por dos vigas, ejerciendo una **carga homogénea de 3,2 ton/viga**.

Tipo de edificio	Descripción de uso	Carga de uso l_0 kPa	Carga concentrada Q_k kN
Bibliotecas	Area de lectura	3	4,5
	Apilamiento de archivos < 1,8 m	5	4,5
	Apilamiento extra por cada 0,3 m adicionales	0,5	-
	Pasillos	4	-
Bodegas	Areas de mercadería liviana	6	4,5
	Areas de mercadería pesada	12 ^{g)}	-
Cárceles	Areas de celda	2	-
	Pasillos	4	-
Escuelas	Salas de clases	3	4,5
	Pasillos	4	4,5
Estacionamientos	Vehículos livianos	3 ^{a), b)}	b)
	Buses, camiones y otros vehículos pesados	c)	c)
Fábricas ^{h)}	Industria liviana	6	9
	Industria pesada	12	13,5
Hospitales	Areas de hospitalización	2	4,5
	Laboratorios/quirófanos	3	4,5
	Pasillos y salas de espera	4	4,5
Hoteles	Habitaciones	2	-
	Areas públicas y sus pasillos	5	-
Iglesias	Con asientos fijos	3	-
	Con asientos móviles	5	-
Oficinas	Privadas sin equipos	2,5	-
	Públicas o privadas con equipos	5	9
	Corredores	4	9
Teatros/estadios	Areas con asientos fijos	3	-
	Areas con asientos móviles o sin asientos	5	-
	Areas para escenarios	7	-
	Areas de uso general, lobbies, plataformas, boleterías, galerías y gradas	5	-
Gimnasios	Pisos principales y balcones	5	-
	Gradas/terrazas/accesos	5	-
Tiendas	Areas para ventas al por menor	4	4,5
	Areas para ventas al por mayor	6	4,5
	Bodegas elementos livianos	6	4,5
	Bodegas elementos pesados	12 ^{g)}	-

Cuadro de cargas de uso,
NCH 1537 (2009)
Fuente
Nch 1537-2009

Esta investigación se dedicará a la optimización estructural de este tipo de vigas, por medio de la exploración de geometrías usando softwares de optimización topológica e investigaciones similares de otros autores, a ello se sumará la optimización geométrica de pilares. El fin de estos ejercicios es extraer la mayor cantidad de masa posible en aquellas zonas que menos aportan al desempeño estructural del sistema, pero que representan un alto costo en cuanto a la cantidad de material utilizado y los recursos asociados a él.



Un mayor volumen de hormigón también hace necesaria una mayor cantidad de acero para mantener su integridad en zonas cuya masa no es necesaria. La optimización topológica no solo representa un potencial ahorro de hormigón sino también de acero al situar cada refuerzo en un vector específico en oposición a las vigas tradicionales, que además de tirantes superiores e inferiores necesitan una serie de estribos dispuestos de forma homogénea a lo largo de la viga para mantener la integridad del hormigón.

Se explorará la optimización topológica a escala de componente y como herramienta en el diseño de piezas repetibles, al identificar un mismo escenario de dimensiones y cargas repetido en múltiples circunstancias en el que se haya la oportunidad de producir en masa una pieza que bajo un mismo diseño es capaz de conciliar múltiples estructuras en el país, respondiendo en su geometría a lógicas productivas con el fin de hacer de su método de fabricación algo tan optimizado como el propio diseño del componente.

Se identifica por tanto a la plástica del hormigón como recurso a ser explotado, ya que como material líquido es capaz de adquirir geometrías complejas y eficientes mediante moldes sin representar un gasto energético mayor o generación de residuos adicional respecto a geometrías ortogonales a comparación de alternativas como el acero o madera que para lograr geometrías óptimas deben hacer uso de operaciones de desbaste o el ensamblado de piezas discretas para la elaboración de reticulados.

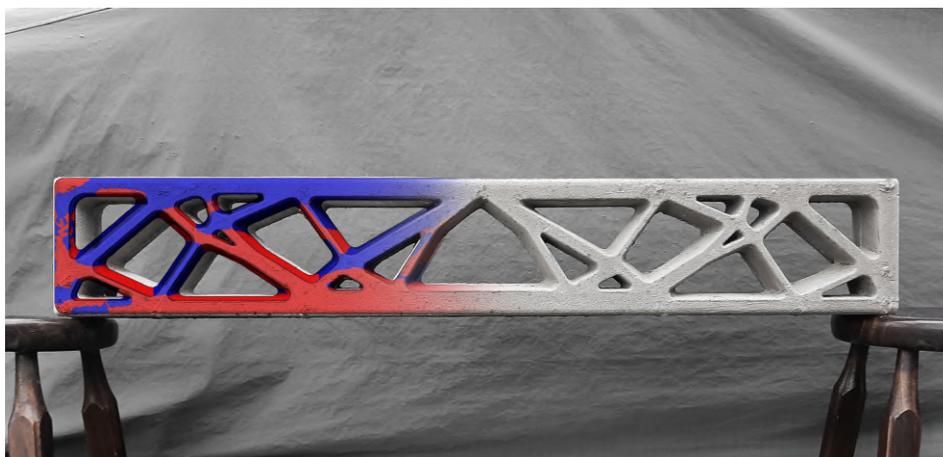
Ante ello, la prefabricación también puede representar una estrategia en la reducción de residuos. Al reutilizar múltiples veces moldajes industriales en la producción de elementos estructurales en entornos controlados, sin embargo al observar el caso de las grillas 8x8 a una escala macro se observa como un mismo diseño estructural, una misma geometría está siendo construida de forma paralela mediante métodos tradicionales en obra, que para cada proyecto debe construir y deconstruir encofrados, los que como estructuras temporales generan residuos ya sea en su completitud, como es el caso de encofrados tradicionales de madera, o en el desecho de placas melamínicas de recubrimiento en el caso de encofrados metálicos. Por otro lado en la utilización de componentes prefabricados el hormigón ya carga con su geometría, siendo únicamente necesario el ensamblaje entre partes, acelerando los tiempos de obra gruesa.

Arriba:

Esquemas anteriores de tracción y compresión de vigas desarrolladas por O.T

Elaboración propia, segundo semestre 2019

Prototipos



La Optimización por componentes comienza a cobrar importancia al escalarse tanto su demanda al reconocer la tendencia en la modulación de estructuras del parque construido, como en su potencial producción en entornos industriales.

La tipología estructural de marcos rígidos de hormigón modulada en 6 y 8 metros puede señalarse como tendencia al identificarse en multiplicidad de edificios y programas desde oficina, hospitales, retail, sedes corporativas y malls^A.

Ante las cifras presentadas en el capítulo de la grilla 8x8, se plantea que discretas mejoras en el peso propio de los componentes podría tener repercusiones significativas en su gran escala. La etapa de prototipos explorará el diseño estructural eficiente de vigas y pilares por medio de ejercicios de optimización topológica que quitará masa a cada componente siguiendo criterios de autores y propios, que serán luego evaluados en análisis estáticos FEA y la fabricación de prototipos físicos.

La etapa de prototipado pondrá su énfasis en el desarrollo de vigas, al tener un mayor potencial de reducción de masa y de variaciones geométricas por cuanto es un escenario de cargas más complejo que el caso de pilares simplemente comprimidos, además de representar una mayor porción de la masa total de una estructura de marcos rígidos.

La optimización topológica parte de la premisa de hallar la geometría teórica más eficiente, sin embargo diferentes investigadores han llegado a diferentes geometrías, ya sea por variaciones en sus procesos o algoritmos. Se pondrán a prueba investigaciones hechas desde la DTU (Dinamarca), UAarhus (Dinamarca) Technion (Israel) y propias (Chile).

La etapa de prototipado tiene como fin poner las diversas exploraciones en un mismo plano de comparación digital y físico, con los siguientes objetivos:

^A Esta investigación aún no obtiene datos globales de la cantidad de Metros cuadrados construidos bajo esta tipología en el país, por ello hará uso temporal de datos levantados de malls, de los cuales extrapolar información.

Prototipado Digital:

- Conocer cómo se comportan las fuerzas al interior de las vigas y como se transfieren desde las zonas de compresión y tracción
- Conocer que miembros de la viga trabajan a tracción y cuales a compresión.
- Que zona es más crítica (Tensión) para el funcionamiento de la viga
- Cuales son posibles puntos de rotura en los diseños
- Como se deformarían las vigas, identificar patrones
- Cómo se comporta ante cargas homogéneas una viga optimizada para cargas puntuales.
- Que viga posee mejor desempeño en relación a su masa*.

Esta etapa consistirá en dos instancias: La primera de optimización topológica para explorar diseños usando el módulo de O.T de Autodesk Fusion 360 (Software de diseño industrial y mecánico) Top.Opt (Plugin de Grasshopper desarrollado por la Universidad técnica de Dinamarca específicamente para optimización topológica). La segunda etapa consiste en la simulación de las propiedades mecánicas de dichos diseños sumado a exploraciones similares de otros autores para ser comparados y evaluados en un mismo entorno digital por medio de análisis de elemento finito (FEA) el módulo de análisis estático de Fusion 360.

Prototipado Análogo:

- Corroborar la constructibilidad de las geometrías mediante moldes, y que rasgos en el diseño facilitan su factura hacia la producción masiva
- Corroborar correlación entre análisis digital y físico ante diferencias en propiedades materiales por separación espacial entre refuerzos de acero y hormigón, diferentes del modelo digital que utiliza un aproximado homogéneo.

Esta etapa consistirá en la fabricación en escala real de los prototipos digitales por medio del fresado CNC de espuma rígida de poliéster para la elaboración de moldes, cuyo modelo 3D corresponde al negativo de la volumetría de las vigas digitales.

Ejemplo ilustrativo de las repercusiones globales de la optimización: La versión optimizada posee un 51,85% menos masa respecto a la original, si por ejemplo dicha eficiencia pudiese escalarse a la tendencia actual en el diseño estructural de marcos rígidos significaría una reducción de **136.940Ton hormigón/año solo en malls**²⁸.



Viga Original: Volumen: 9,5m³ /Masa: **21,85 Ton**/ Huella CO₂: 12,76 Ton



Opt. Topológica: Volumen: 4,6m³ /Masa: **10,58 Ton**/ Huella CO₂: 6,17 Ton

²⁸ Basado en los datos extrapolados de la cantidad de m² de malls construidos durante 2017 en Santiago, se sospecha de cifras mayores en la totalidad de edificios que siguen la tendencia estructural anteriormente descrita.

Izquierda:

Ejercicio de Optimización topológica sobre viga principal de sistema constructivo elaborado por L. Kahn, tarea 3 TPT

Elaboración propia.

Optimización Topológica

La optimización topológica es una herramienta matemática que optimiza las conexiones y geometría en la que el material se dispone dentro de un espacio determinado. En entornos digitales discrimina entre las zonas que menos aportan a la resistencia de un componente y las que son cruciales al entender el comportamiento de las cargas en su interior ante un escenario de cargas, apoyos y dimensiones.

Su principio fundamental es el de remover masa donde está trabajando menos (menor Tensión), existen diferentes algoritmos que remueven masa según variados criterios y modelos, clasificables a grandes rasgos entre discretos y continuos²⁹:

Discretos: Subdividen la volumetría en unidades finitas más pequeñas (similar a píxeles o vóxeles) con valores absolutos acorde a si debe estar o no presente, por lo que tiene un carácter binario: 1 o 0. Destacan dos ejemplos de este tipo:

ESO: (Optimización estructural evolutiva) Elimina material donde no es eficiente

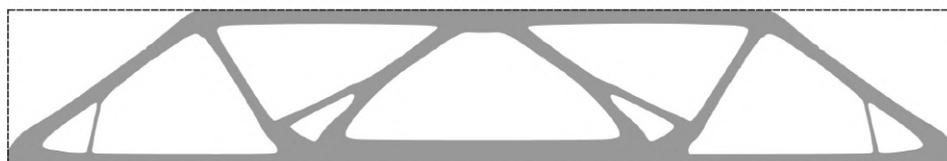
BESO: (Optimización estructural evolutiva bidireccional) Elimina material donde no es eficiente y además agrega material adicional donde las cargas son mayores

Continuos: Son capaces de variar la densidad material dentro de la volumetría, de forma que cada subdivisión puede alcanzar valores intermedios entre 0 y 1, Destaca:

SIMP: (Material isotrópico sólido con penalización) Puede controlar la geometría del elemento utilizando como única variable la densidad.

La geometría entregada suele variar con el tamaño de cada subdivisión, (tamaño de malla o mesh) aun cuando las dimensiones físicas son las mismas, y con resoluciones más bajas algunas zonas parecen dentadas en una cuadrilla, ante ello diferentes softwares hacen uso de filtros, que a grandes rasgos transforman esos dominios discretos en continuos (Similar a como se vectoriza una imagen rasterizada).

En la literatura existe una estrecha relación entre el concepto de optimización topológica y la Impresión 3D que esta investigación busca desafiar. Suele asociarse la complejidad formal de la optimización topológica con geometrías que son solo posibles de manufacturar por medio de impresión 3D al incorporar cavidades interiores o múltiples trabéculas demasiado finas, ante ello es también un ejercicio de depuración geométrica de esta investigación lograr que la volumetría sea manufacturable por medios de producción masiva como el moldaje, que aprovechando la plástica del hormigón puede dotar a un componente de complejidad formal con la misma facilidad que logra geometrías ortogonales en moldajes simples. Para ello recoge principios bidimensionales de ejercicios de O.T cuya interpretación tridimensional no es una extrusión directa sino que posee rasgos que facilitan el desmoldaje al incorporar superficies inclinadas y curvas.



²⁹ Optimización topológica bidireccional con esquema de penalización de material y restricciones de desplazamiento
Patricio Uarac
Juan Pablo Sanhueza

Derecha:

Ejemplo de esquema de Viga MBB propuesta por Gregoire Allaire, identificando vectores dentro de un espacio ortogonal simplemente apoyado con carga central y proporción 1:6
Fuente:

Structural optimization under overhang constraints imposed by additive manufacturing processes:

Esta investigación hizo uso de dos softwares distintos de optimización topológica, Fusion 360 desarrollado por Autodesk y TopOpt, desarrollado por la DTU.

El proceso de O.T en **Fusion 360** parte con una volumetría Inicial, generalmente ortogonal y básica como un prisma, cuya única información base son las dimensiones globales del elemento, sin embargo otras veces dicha volumetría inicial puede ser más compleja como el ejemplo anterior que corresponde a la viga central del sistema constructivo del Richards medical research centre de L. Kahn.

Posteriormente a dicha volumetría base se le asigna propiedades mecánicas que dependen del material, las que se pueden sacar de la librería del mismo software o pueden ser ingresadas manualmente de conocerse de otra fuente. Estas son:

1-Módulo de Young (Young module): Módulo de elasticidad que da a conocer la rigidez y deformación unitaria por cada unidad de fuerza, corresponde a **27 Gpa**.

2-Coeficiente de Poisson (Poisson ratio): Informa el cambio de sección (angostarse o engrosarse) al traccionarse o comprimirse un elemento, corresponde a **1:5 (0.2)**.

3-Tensión de Rotura: (Ultimate tensile strength): Es la máxima tracción que un material puede soportar hasta que deja de oponerse a la fuerza, corresponde a **1,2 Mpa**.

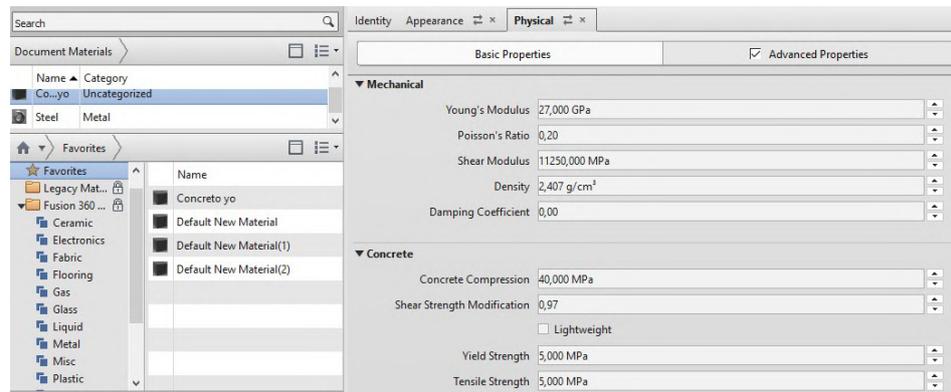
4-Compresión: Resistencia unitaria material ante fuerzas de compresión hasta antes del colapso por medio de pandeos u abolladura. Corresponde a **40 Mpa**.

5-Módulo de corte: (Shear module): Deformaciones ante una fuerza de corte o cizalle, que en el caso de una viga son las fuerzas perpendiculares a su largo, generalmente la misma dirección en que se recibe las cargas, corresponde a **11,25 MPa**.

6-Densidad: (Density) Cantidad de masa por unidades de Volumen, determina el peso con un volumen dado, corresponde a **2,407 g/cm³** (2,4Ton/m³ en hormigón armado)

7-Coeficiente de Amortiguación: (Damping ratio): Explica la forma en que decae la disipación de energía luego de una oscilación (amortiguación), al tratarse de un análisis estático y no haber movimiento, no se considera. = 0

Para este ejercicio se hizo uso de la norma chilena NCH 170, que clasifica a los hormigones según su resistencia a la compresión y su resistencia a la flexo-tracción, se ha optado por un hormigón de G40 (resistencia a la compresión de 40Mpa) y HF 5.0 (Resistencia a la tracción de 5Mpa) que afecta los valores de compresión y de tensión/rendimiento, dejando las demás variables con los valores predeterminados por el software. Esta elección responde a que hormigones con dichas características son comunes en componentes prefabricados nacionales.



Luego de determinado el volumen base y su materialidad, se asignan las limitantes del problema (boundary conditions) que corresponden a:

1-Apoyos (Constraints): Asociados a una parte de la volumetría, y que poseen una ubicación y tipo, que puede ser Fijo (Fixed) que restringe momentos y movimientos en Eje X e Y, Móvil (Frictionless) que restringe movimientos solo en Eje Y, y Rótulas (pin point) que restringe solo movimientos en Eje X e y pero permite rotaciones, en este ejercicio corresponderá a **Apoyo fijo y móvil ubicado en los extremos**, al despreciar la estabilidad en Eje X que aportan los pilares.

2-Cargas (Loads): Al igual que los apoyos poseen una ubicación asociada a una parte de la volumetría, así como una magnitud, dirección y un tipo, que puede ser Fuerza (Force) con una dirección constante, Presión (Pressure) con una dirección siempre perpendicular a la normal de la superficie, en este ejercicio corresponderá a una **Carga Homogénea superior**, simulando las cargas que recibiría al soportar una serie de losas alveolares dispuestas a su largo.

Finalmente existen otras variables del análisis que tendrán impacto en el resultado de la simulación de optimización formal que no necesariamente son mecánicas sino que pueden responder a variables constructivas o de otro tipo:

Arriba:

Interfaz del editor de materiales, en que se puede dotar de propiedades físicas, útil tanto en ejercicios de optimización como de análisis estático.

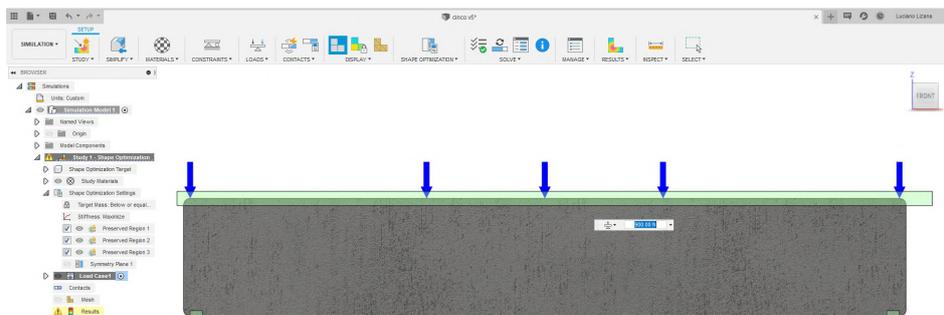
1-Zonas a preservar (Preserve region): Volumen virtual que determina zonas dentro del elemento que no deben ser removidas o afectadas por el proceso de optimización topológica a pesar de que su aporte estructural sea nulo, se fuerza a la simulación a adaptarse a dichas zonas, por lo que en un ejercicio de síntesis puede reemplazar un miembro estructural teórico por una de estas zonas si está lo suficientemente cerca, en el caso de estudio, dichas zonas corresponden a las **carpinterías de unión entre elementos, zonas de apoyo y zonas de carga**.

⁰ Evolution Strategies-Based Metaheuristics in Structural Design Optimization/ Chara Ch. Mitropoulos Matthew G. Karlaftis, in Metaheu

2-Planos de simetría (Symmetry plane): Es capaz de forzar ejes de simetría en 1, 2 o 3 planos si es que se estima que el volumen, escenario de cargas y apoyos son simétricos y debería arrojar un output simétrico, esto ya que a pesar de la teoría, no siempre el output es simétrico en escenarios de carga simétricos dada anomalías en la malla (mesh), adicionalmente parece tener impactos en los tiempos de procesado, ya que analiza y simula solo la mitad del elemento espejando luego los resultados. Corresponderá a **ejes de simetría en los planos X e Y**.

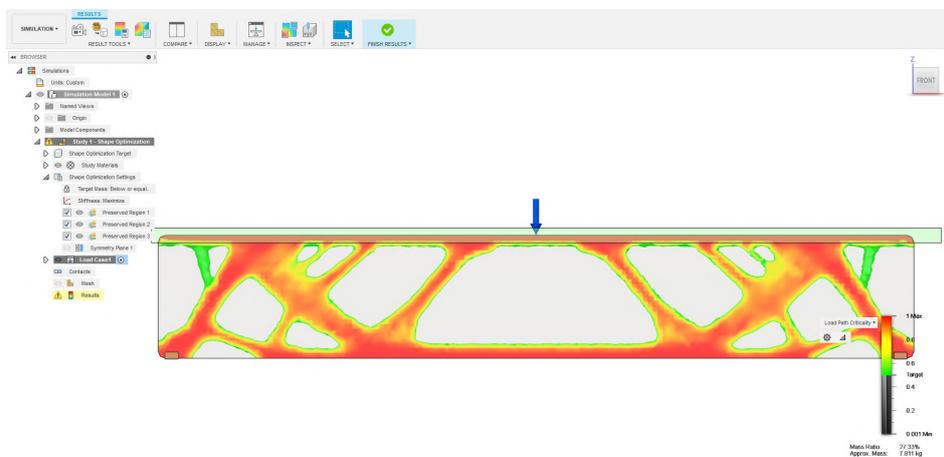
3-Malla (Mesh) : tiene impacto en la definición de la simulación, tiempos y síntesis formal. Para poder analizar el comportamiento de las cargas y fuerzas al interior del elemento simulado. Se descompone su volumetría en unidades más pequeñas, similar a como píxeles componen una imagen, (Vóxeles en 3 dimensiones) dichas unidades componen poliedros simples, los que en su conjunto arman una Malla o Mesh, similar a como sucede en una imagen, el tener una mayor cantidad de unidades y de menor tamaño resulta en una simulación de mayor definición, arrojando geometrías más precisas, sin embargo tiene un directo impacto en los tiempos de simulación, ya que son más unidades a procesar.

Adicionalmente tiene una gran importancia al impactar directamente en la forma arrojada, mallas demasiado finas arrojan geometrías más fieles al ideal teórico, pero que constructivamente son imposibles, descomponiendo una viga en una multitud de varillas finas, mientras que mallas de densidad intermedia arroja diseños más sintéticos resumiendo múltiples varillas cercanas en un solo miembro de tamaño medio construible que logra aportar la mayoría de la resistencia estructural, finalmente mallas demasiado gruesas arrojan geometrías inconexas y que no sugieren un diseño.



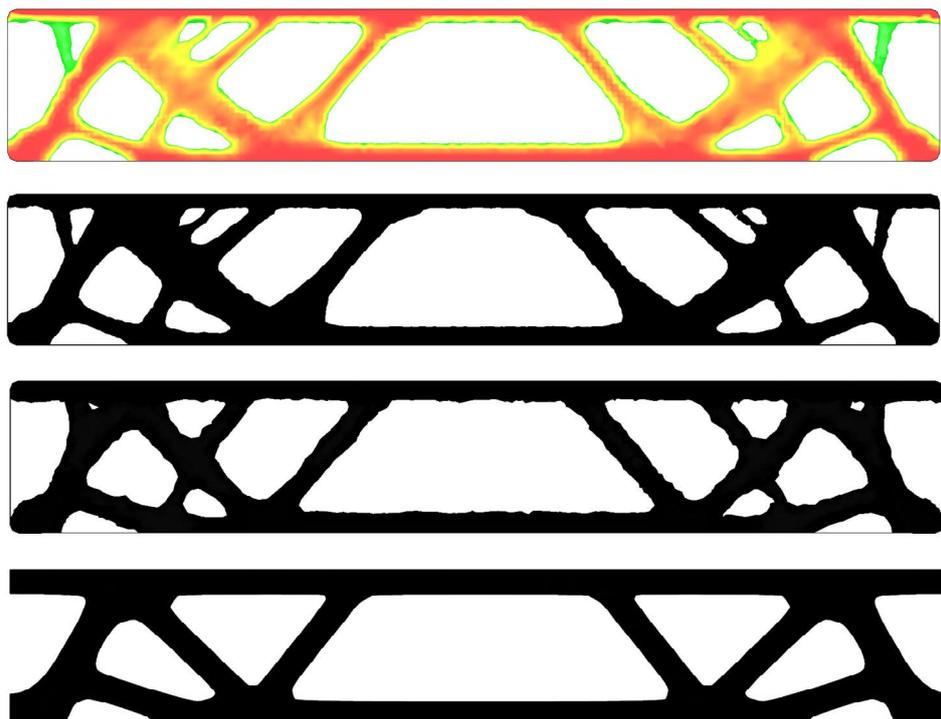
Arriba:

Interfaz de Fusion 360, en verde las zonas a preservar, las flechas azules indican la superficie sobre la que se efectuará la carga homogénea y en los rectángulos verdes inferiores se aprecia las zonas de apoyo.



Abajo:

Interfaz de Fusion 360 luego de completada la simulación, en colores más cálidos las zonas que más aportan a la resistencia del componente y en colores fríos los que menos.

**Arriba**

Resultado obtenido de Fusion 360, seguido de iteraciones que modifican la densidad de malla, siendo el tamaño de malla inversamente proporcional a la complejidad geométrica del elemento.

Primero: Malla: 0.3%

Segundo: Malla: 1%

Tercero: Malla: 1,3%

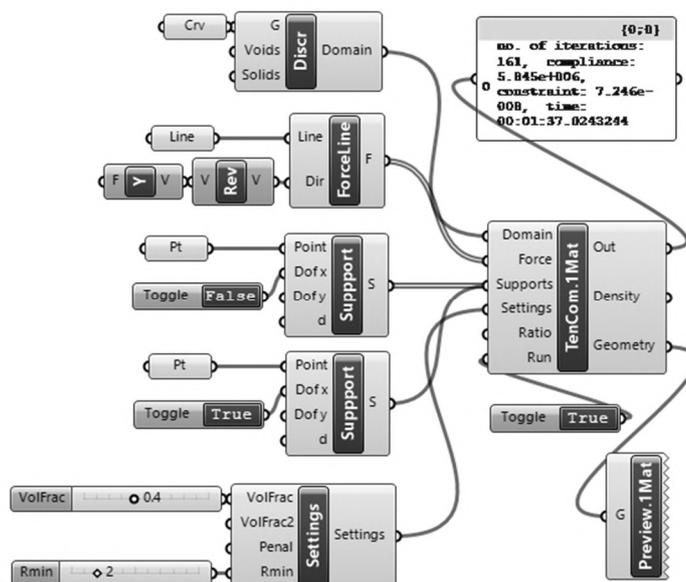
Elab propia

Derecha:

Definición de Grasshopper del ejercicio de vigas desarrollado en TopOpt, su interfaz está ordenada desde el dominio (forma general de componente), zona y tipo de cargas, zona y tipos de apoyo y configuraciones, que regulan la proporción lleno/vacío tamaño de malla

Elab propia

Además de Fusion 360 se hicieron pruebas similares con **TopOpt**, plugin de Grasshopper desarrollado por la universidad técnica de Dinamarca, que a diferencia de Fusion 360, es de carácter fundamentalmente bidimensional, trabajando a nivel de esquema, dados una ubicación y tipos de apoyos, carga y dimensiones generales, sin embargo no integra en su análisis las propiedades mecánicas del material sino materiales de propiedades lineales elásticas, "TenCom.1Mat" utilizado en este ejercicio y apropiado para materiales con propiedades mecánicas que prioricen la compresión sobre la tracción, como el hormigón, y finalmente "TenCom.2Mat" que es similar al anterior pero permite componentes de materiales híbridos, por ejemplo de madera y acero, situando el de mejor performance de tracción a las zonas traccionadas.



**Izquierda:**

Resultado óptimo obtenido de TopOpt, como viga con apoyos simples y carga homogénea, notar como su morfología asemeja más un arco al priorizar la compresión por sobre la tracción.

Elab propia

Análisis estático por elementos finitos

El análisis de elemento finito es un método numérico cuyo propósito es el de predecir el comportamiento de sólidos ante solicitaciones de fuerzas y desplazamientos impuestos. Es ampliamente utilizado en campos como la ingeniería mecánica e ingeniería estructural, y será implementado en esta investigación.

El análisis estático simula el comportamiento de un cuerpo ante una carga dada su geometría, ubicación/tipos de apoyo, ubicación/tipo/magnitud de carga y las propiedades mecánicas del material ya mencionadas en el apartado de O.T. Es capaz de resolver ecuaciones de elasticidad en geometrías complejas, indicando zonas críticas y fuerzas/tensiones al interior del elemento, emulando en un entorno digital lo que se esperaría de una prueba de cargas real.

Este ejercicio busca situar un mismo plano comparativo los diferentes diseños tanto propios como de autores, con el fin de comprender como trabajan, identificar con precisión posibles zonas de roturas y comparar su desempeño estructural respecto a la cantidad de masa contenida. Del análisis se recogen los siguientes parámetros:

-Factor de seguridad: Indica cuantas veces soporta el elemento la carga objetivo, además de que zonas son más críticas para el correcto funcionamiento estructural del componente.

-Tensión XX: Muestra la tensión en el material según las fuerzas normales, vale decir en el plano paralelo a la longitud de la viga (apreciables en su elevación).

-Zonas de tracción y compresión: Es una polarización del parámetro anterior, discriminando toda la viga entre fuerzas de tracción y compresión.

-Tensión Von Mises: indica puntos potenciales de rotura en la viga.

-Desplazamiento: Indica las deformaciones luego de recibir cargas y la ubicación de cada parte de su geometría respecto a la original.

Los parámetros anteriormente mencionados y su funcionamiento es transversal a diversos programas de análisis estáticos como SolidWorks, Simscale, Ansys y Autodesk Inventor, en esta investigación se hará uso del módulo de static analysis de Autodesk Fusion 360.

Se simularan modelos 3D de propuestas de diversos autores y de exploraciones propias, todas bajo un mismo formato llamado "MBB Beam" (viga simplemente apoyada con carga central y proporción 1:6) que es el estándar comparativo en textos académicos referentes a optimización topológica de vigas. Con el fin de ponerlas en un mismo plano de comparación en que la única variable sea su geometría y se puedan apreciar sus diversos comportamientos ante una misma carga y materialidad.

Prototipo Físico

La elaboración de prototipos físicos de hormigón armado busca corroborar su coherencia con las simulaciones digitales, ya que si bien la fidelidad de los análisis FEA ha sido validada hace décadas no se está trabajando con materiales lineales isotrópicos (metales, plásticos) o como es el caso de las simulaciones con un promedio homogéneo de las propiedades físicas del hormigón, sino que el material real tiene enfierradura y hormigón en distintos lugares de la geometría del elemento influyendo en su desempeño.

Es una prueba de su manufactura y método de producción a través de simples moldes laterales reutilizables, con potencial de producción en masa y abaratar costos, en oposición a los sofisticados métodos de producción utilizados convencionalmente en ejercicios de optimización topológica de hormigón.

Se optó por moldes laterales, que dibujan la forma de la viga desde su elevación (fuerzas normales) ya que es ese el método observado en el levantamiento de las plantas productivas.

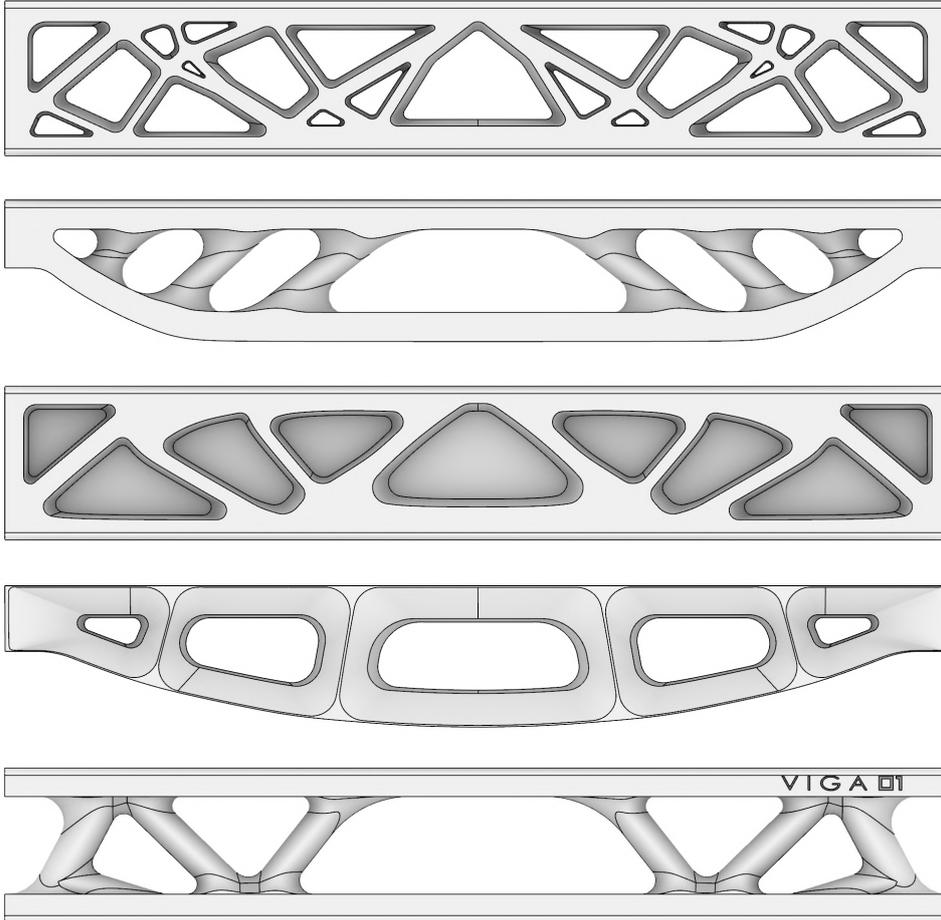
La posibilidad de manufactura por medio de moldes está en estrecha relación con como la geometría que el componente cobra tridimensionalidad desde su elevación, ya que si bien los rasgos geométricos desarrollados a lo largo influyen más en la capacidad estructural, sus rasgos desarrollados en el espesor serán los que posibiliten o no su factura, haciendo uso de ángulos de desmolde (draft) y geometrías curvas en relación al ángulo de salida de la pieza respecto al molde.

Para ello se tomarán las mismas geometrías usadas en los ejercicios y simulaciones digitales para vaciar cavidades en el modelo 3D de un molde, dicho modelo fue manufacturado por medio de una fresadora CNC en una plancha de 5cm x 2,4x1,22m de poliéster extruido rígido *Foamular de densidad 250* (comúnmente utilizado en CNC para la elaboración de moldes).



Derecha:
Fresado CNC de moldajes
de prototipos digitales

A cada viga se le asignaron diferentes estrategias de desmolde, desde la inclinación de las caras en cavidades interiores, (Viga 1 y 3), secciones curvas en trabéculas dentro de la viga (viga 2 y 5) y la transición geométrica entre delgadas nervaduras dibujadas en las caras externas hasta cavidades interiores en el caso de la viga 3.



La plancha de Poliéster extruido fue reforzada con una placa de MDF de 15mm en su reverso, para estabilizar la espuma durante el fresado de los moldes en CNC, también dio rigidez a los moldes para aguantar el peso del hormigón durante el vaciado.

Luego de terminado el fresado de la placa, se seccionó para separarla en 10 moldes, que arman el anverso y reverso de 5 vigas.



Arriba:

Modelos 3D de prototipos digitales, interpretación tridimensional y apropiación de diagramas MBB de investigadores y propios

Abajo:

Seccionado con sierra circular de placa de MDF sobre la cantería divisoria entre cada molde de espuma

Una vez seccionado y transportado, se lijaron las caras interiores de los moldes para mejorar su acabado.



Luego de tratar las superficies, se recubrieron para sellar los poros de la espuma y se aplicó una capa de desmoldante *Topex desmol madera* para evitar la adherencia de los moldes al hormigón.



Arriba:

Diferencia en acabado de superficies antes y después de lijar.

Medio:

Ambas mitades del molde de la viga número 2

Abajo:

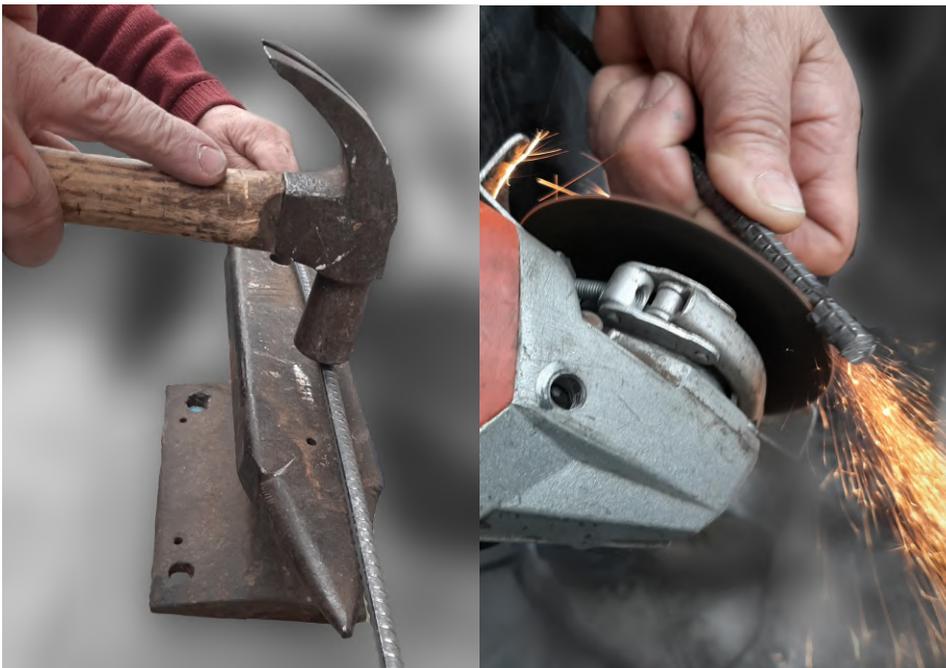
Aplicación de desmoldante en caras internas del molde

Para alinear ambas caras del molde, se perforaron dos agujeros en cada una, con un diámetro de 20mm, que luego recibiría un tarugo de madera que se insertaría en ambas caras una vez el molde es cerrado.



Una vez listos los moldes se trabajó en la elaboración de la enfierradura de las vigas, cuya forma sigue los vectores de los miembros al interior de la viga, para ello se usó acero estriado de 8mm.

El acero fue seccionado y en el caso de elementos curvos, su curvatura se dio mediante un yunque y martillo.



Arriba:

Ambas mitades del molde de la viga número 3, se aprecian las perforaciones y tarugos de alineamiento

Abajo:

Corte con de acero estriado con esmeril angular y formado de secciones curvas con martillo y yunque.

Las uniones entre cada pieza de acero se hizo con un nudo de alambre recocado, armando una cruceta entre cada pieza. Si bien la solución ideal hubiese sido plegar como una "Z" cada trabécula y amarrar a lo largo de las barras superiores e inferiores, no fue posible por la rigidez del acero y no disponer de herramientas especializadas.



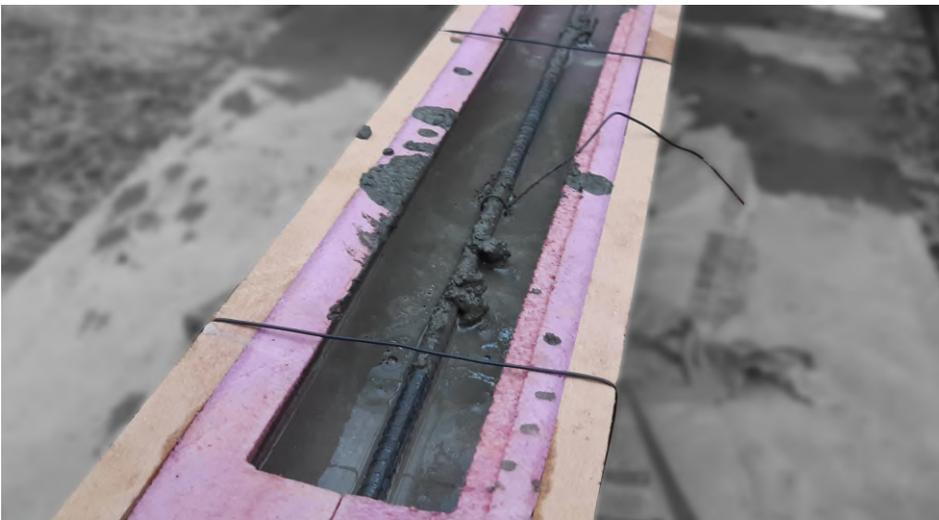
Arriba:
Detalle de nudo de cruceta
entre ambos fierros

Abajo:
5 de los 10 moldes junto a
la enfierradura terminada
de cada viga en su interior

Una vez listas la enfierradura y moldajes se procedió a su cierre, para lo que se usó alambre tensado entre ambas caras de madera, junto al sellado de la junta entre ambas mitades para evitar fugas, la enfierradura se mantuvo centrada mediante una serie de alambres que van desde la enfierradura a la cantería entre moldes.



Otros alambres que permiten controlar la parte superior de la enfierradura mientras el hormigón H40 se vierte a la mezcla permiten mantenerla recta dentro del molde, La mezcla se depositaba primeramente en las trabéculas que comunicaban la parte superior con la interior de la viga.



Arriba:

Amarre de ambas mitades del molde una vez alineadas y con la enfierradura en su interior la tensión del alambre comprime ambas caras de la espuma creando un sello hermético

Medio:

Vaciado en una de las vigas mientras amarras externas estabilizan la enfierradura



Abajo:

Vista superior de moldes, desde la cara en la que se vaciará el hormigón, las cavidades formadas por las trabéculas en el diseño permiten hormigonar el borde inferior

En paralelo al vertido de hormigón, una caladora sin su hoja vibra el moldaje para promover la fluidez dentro de las cavidades, así como extraer el aire de la mezcla.



Una vez vertido el hormigón en todos los moldajes, se dejó fraguar durante 72 horas antes de su desmoldeo, al adquirir ya gran parte de su resistencia acorde a lo especificado en la NCH 170, luego de 28 días llegaría a un valor cercano de su resistencia final.



Arriba:

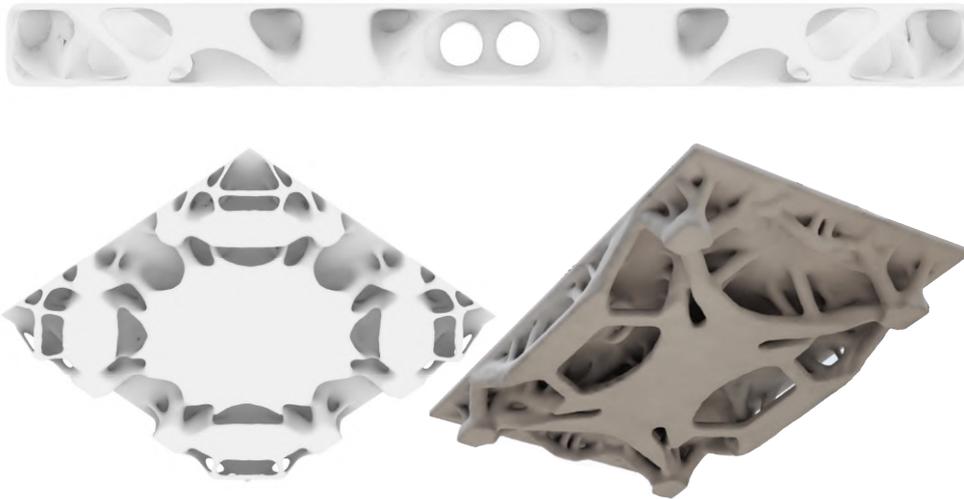
Vibrado del hormigón mientras se vacía en el molde mediante una caladora, oscilación sobre un tarugo y golpes de martillo.

Abajo:

3 de los 5 moldes reunidos, con dos de ellos curando luego de 24 horas.

Resultados / Optimización Topológica

Ejercicios iniciales de optimización de losa del Richards medical Research centre llevó a resultados que formalmente se asemejan a investigaciones de O.T de otros autores, además de la Optimización de componentes constructivos (pag 22).



Vigas:

Se hicieron dos ejercicios de optimización dentro del formato comparativo respecto a las vigas de demás investigadores, usando Fusion 360.

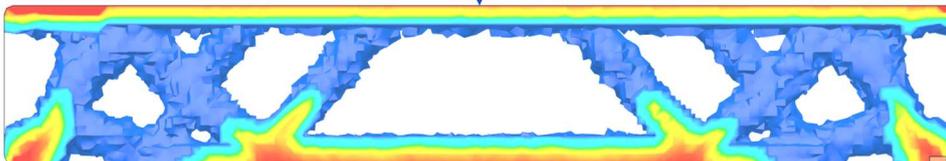
Se aprecia cómo ante cargas homogéneas la figura central de las vigas de elaboración propia tienden a espaciarse a comparación de las vigas optimizadas para cargas puntuales.

Se aprecia cómo ante una densidad de malla menor la resultante es similar a un reticulado, con cambios de miembros traccionados y comprimidos en cada nodo, mientras una malla más fina genera geometrías más complejas en que cuerpos comprimidos y traccionados se intersectan.

En ambos casos se aprecia como fenómeno común la remoción de masa en los bordes izquierdo y derecho al no coincidir con el arco externo que se forma desde El centro superior hasta los apoyos. En ambos casos se aprecia como el tirante inferior se eleva hacia los extremos, presumiblemente en la búsqueda de mayor momento, similar a la estrategia adoptada por la viga 2.

Se aprecia una arborización en los miembros externos de la viga 4, en que el arco externo y una especie de "ménsula" que soporta el volado de la zona superior se unen en un solo miembro, por el contrario la viga 5 sintetiza el diseño haciendo dicha zona más robusta y no haciéndose cargo de la zona en volado al extremo de la viga.

Los resultados obtenidos serán discutidos junto a los de autores⁷.



⁷ Autores:

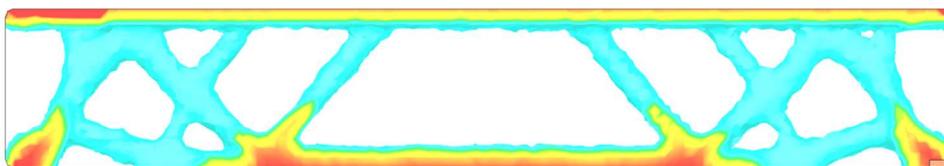
Oded Amir, Emad Shakkour, Anders Clausen, P. Dorembsky

Arriba /Izquierda
Ejercicios propios de depuración de losa siguiendo el esquema estructural del Richards medical research centre

Arriba/Derecha
Ejercicio de O.T de losa hecha en encofrado perdido impreso en 3D ETH Zurich

ELab propia 1 /Fusion 360, Abril 2020

Viga MBB con densidad de malla del 1%

**ELab propia 1 /Fusion 360, Abril 2020**

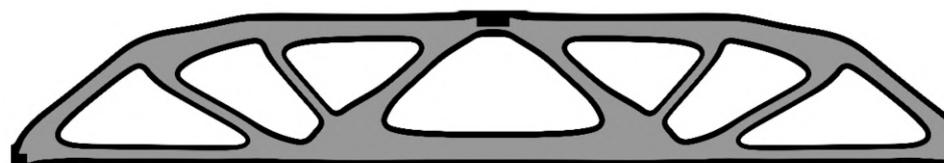
Viga MBB con densidad de malla del 1%

**ELab propia 2 /Fusion 360, Abril 2020**

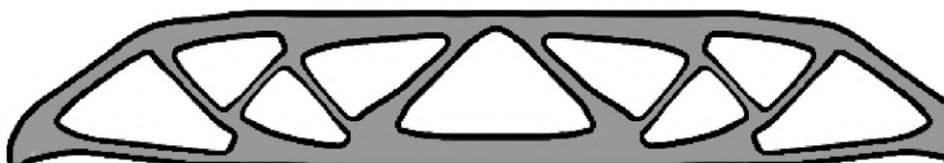
Viga MBB con densidad de malla del 1,3%

**Aarhus University
Anders Clausen / A**

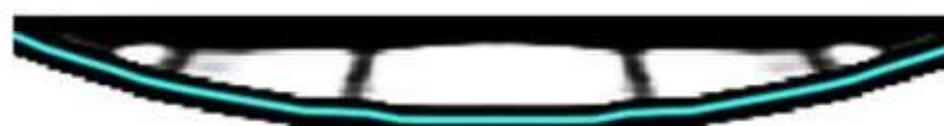
Exploiting Additive Manufacturing Infill in Topology Optimization for Improved Buckling Load

**Aarhus University
Anders Clausen / B**

Exploiting Additive Manufacturing Infill in Topology Optimization for Improved Buckling Load

**Technion Structural Optimization Research Group /**

Simultaneous shape and topology optimization of pre-stressed beams



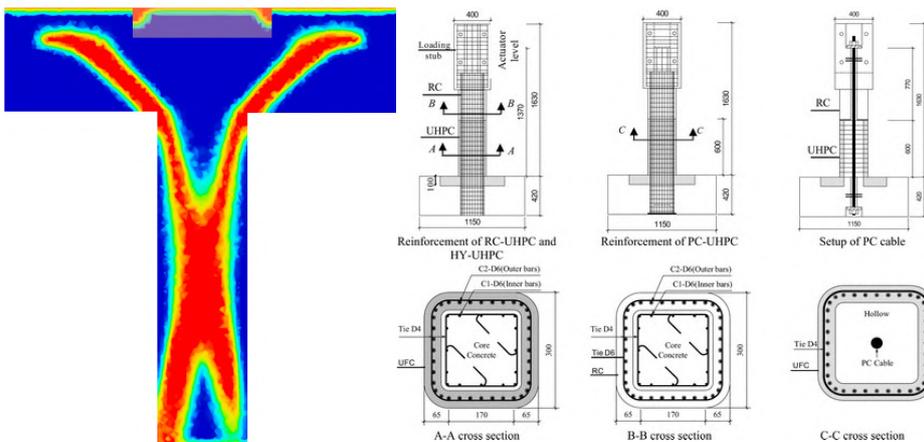
DTU P.Dombernowsky & A. Søndergaard / topologiøptimering af betonkonstruktioner



Pilares:

En pilares no existe distancia en planta entre la zona que recibe cargas y la zona de apoyo, de esta forma es un elemento que dado un vector vertical de carga (Peso) trabaja fundamentalmente a compresión, a diferencia de las vigas que para transmitir fuerzas entre zonas de carga y de apoyo, debe resolver transiciones entre tracción y compresión.

Esto hace que la optimización de pilares arroje geometrías más simples, que para responder a las cargas que se somete se puede comprender solo como una trabécula. Sin embargo su geometría aún se puede optimizar desde la sección, entendiendo otras deformaciones como el pandeo:

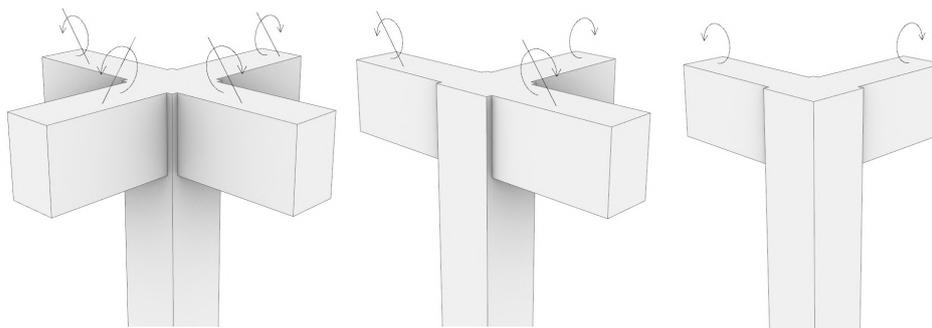


Ejercicio de O.T propio en Pilares / Nudo plar-viga

Tendencia a ahuecar pilares condujo a investigaciones existentes sobre columnas huecas de perfil cuadrado Enero 2020

De esta forma, al situar su masa en los bordes de la sección evita deformaciones por pandeo con mayor éxito que la misma cantidad de masa dispuesta en una sección maciza. Se propone el uso de un perfil cuadrado con esquinas redondeadas, de esta forma no genera aristas de espesor mínimo que concentren Tensión y recibe a las vigas desde sus testas.

Otra variable que puede sofisticar la geometría de pilares, es diseñarlos desde sus momentos de torsión, al tratarse de un sistema de marcos rígidos (moment frame). Esto diferenciaría las fuerzas que actúan en cada pilar según su ubicación en planta; De esta forma un pilar en el borde de la planta se expondría a un momento de torsión (más dos en equilibrio, cancelados), un pilar al interior de la planta, no se expondría a momentos de torsión (4 momentos en equilibrio, cancelados) y un pilar en la esquina de la planta se expondría a 2 momentos de torsión:



Momentos de torsión en pilares:

Momentos de torsión que actúan en un pilar según su ubicación en planta:

- 4 pilares: 4 momentos cancelados
- 3 pilares: 1 momento de torsión y 2 cancelados
- 2 pilares: 2 momentos de torsión

Las fuerzas de torsión son significativamente menores a las de compresión, por lo que si bien es de interés teórico explorar geometrías de pilares desde la torsión, su impacto es relativamente menor, además de que dicho rol descansa en las conexiones metálicas apernadas propuestas.

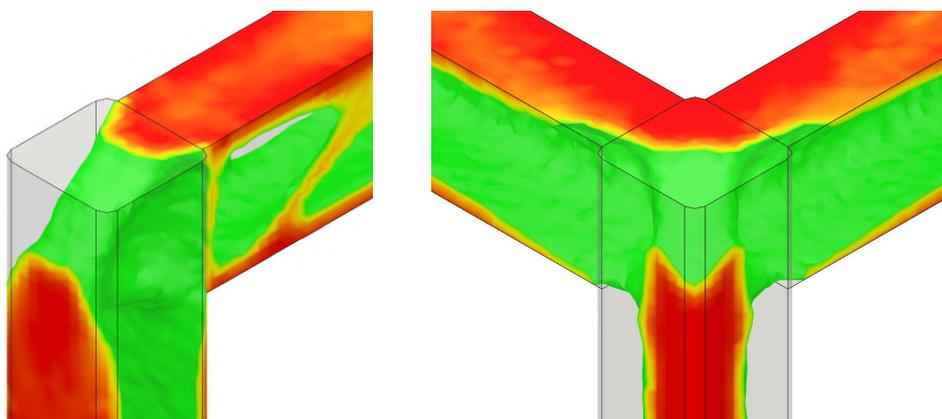
Pilares con cabezales optimizados para fuerzas de torsión:

Exploración geométrica en base a la torsión producida pilares, para el ejercicio se suprimieron las cargas de compresión en su parte superior (pesos) para poder observar mejor el fenómeno.

Izquierda:
Cabezal optimizado para 1 momento

Derecha:
Cabezal optimizado para dos momentos

Elaboración propia.



Se estima que el mínimo ahorro material que este ejercicio representa no lograría justificar la complejidad añadida al proceso de manufactura, a la vez que dejaría de ser una geometría extruible, una cualidad conveniente en el caso de los pilares, tomando en cuenta que la tipología 8x8 tipifica dimensiones de elementos en planta, no así sus alturas de piso a cielo.

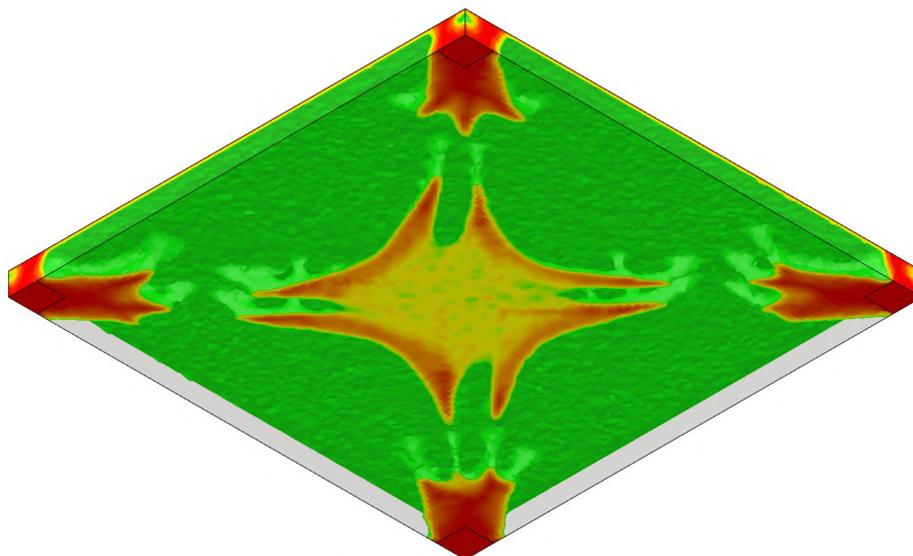
Losas:

En el caso de losas sí existe distancia en planta entre las zonas que reciben carga y las zonas de apoyo, sin embargo para poder desarrollar rasgos geométricos que respondan al comportamiento de las cargas de su interior necesita un mayor espesor en proporción a su largo. Bajo este esquema, el espesor adquirido por la losa reemplazaría el rol de las vigas, no ajustándose a la tipología 8x8.

Adicionalmente, la complejidad de manufacturar, transportar y manejar una pieza de tales dimensiones no se ve justificada por el mínimo ahorro material que ofrece frente a losas pretensadas convencionales.

Losa Optimizada desde apoyos en vértices

Exploración geométrica en losa desde una carga homogénea superior y apoyos en las esquinas, formación de diafragma de tracción en su centro y de miembros cercanos a los apoyos



Resultados / Análisis FEA

La etapa de resultados se dividirá en cada uno de los parámetros cuantificables del análisis finito de vigas, presentando imágenes junto a observaciones y conclusiones a partir de ellas.

- Compresiones y tracciones,
- Factores de Seguridad,
- Tensiones normales (Plano XX)
- Tensiones de Von Mises.

La discusión de los resultados de las imágenes de análisis fea se discutirá en paralelo.

Tracción y Compresión.

Todas las vigas poseen las mismas dimensiones generales, pero para transmitir las fuerzas desde la carga central hacia sus apoyos en los extremos hacen uso de distintas estrategias, que en base a la observación pueden clasificarse como basadas en tracción y basadas en compresión.

Un pilar puede llevar sus cargas directamente al suelo, una viga de esbeltez 1:1 con apoyos en los extremos puede crear un arco en su interior, una viga esbelta por otro lado debe hacer constantes transiciones entre fuerzas de tracción (rojo) y compresión (azul) para poder transmitir sus cargas a los apoyos, para ello hace uso de "miembros" ubicados entre el borde inferior y superior. La disposición de estos es el dominio en el que cada viga varía respecto a las demás en la búsqueda de la eficiencia estructural.

Por teoría general de vigas se puede concluir que la zona de compresión de una viga simplemente apoyada está en el borde superior, y que la zona traccionada está en el borde inferior. La viga doble T se origina de este principio, está pensada desde su sección poniendo más masa en las zonas de mayor momento, sin embargo omite en su diseño las diversas transiciones de cargas entre borde superior e inferior que ocurren a lo largo de la viga, situando un alma homogénea entre zonas superior e inferior, respondiendo a lógicas productivas al ser una geometría extruible.

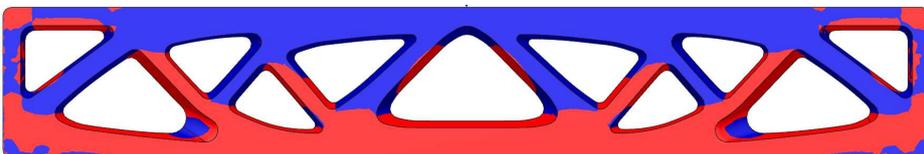
Se reconoce como fenómeno de la serie de análisis estáticos que los miembros que trabajan a compresión al interior de las vigas optimizadas tratan de formar una serie de "arcos" consecutivos y concéntricos desde la zona central superior hasta llegar a los apoyos en la parte inferior de los extremos.

Por otro lado los miembros que trabajan en tracción suelen formar una serie de "tirantes" desde la parte inferior central hacia la zona superior e inferior de los extremos.

Se reconoce que los tirantes tienden a colgar desde el nodo superior de los arcos, y los arcos tienden a apoyarse en los nodos inferiores de los tirantes, trabajando colaborativamente para poder llevar las cargas desde el centro a los extremos.

Se reconoce además que tanto los miembros traccionados como comprimidos tienden a hacerse más horizontales hacia los extremos.

El principal factor diferenciador entre cada viga es el carácter y número de alternaciones entre miembros comprimidos y traccionados: En la viga 1 se identifica un cambio entre fuerzas de tracción y compresión en cada nodo.

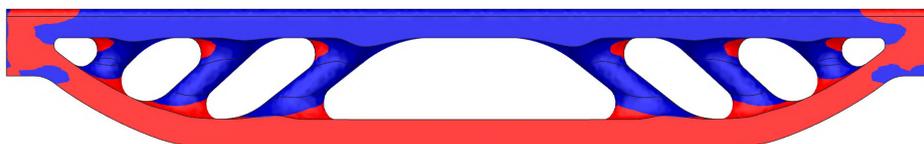


1 Aarhus University
Anders Clausen/
 Exploiting Additive
 Manufacturing Infill in
 Topology Optimization for
 Improved Buckling Load

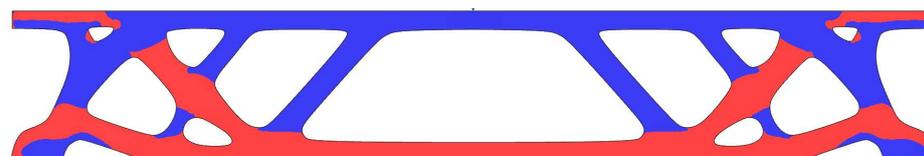
2 Technion Structural Optimization Research Group /

Simultaneous shape and topology optimization of pre-stressed beams

Por otro lado, en la viga 2, se identifican tres miembros comprimidos consecutivos apoyados en un solo tirante inferior que une los extremos superiores.

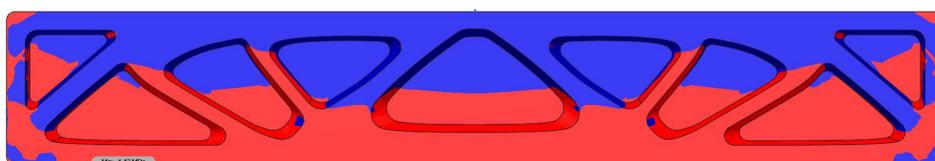


En la viga 3 se puede observar un traslape entre miembros a compresión y miembros a tracción, haciendo sus intersecciones más robustas, permitiendo que la segunda mitad de las trabéculas comprimidas pueda ser más delgada.



3 ELab propia 1 /Fusion 360, Abril 2020

En la viga 4 se logra apreciar como el tabique interior libera parte de la tensión de los miembros, subdividiéndose por la mitad entre tracción y compresión similar a una viga monolítica, sin embargo la extensión de las fuerzas de tracción a través de los miembros acusan su aporte estructural mayor.



4 Aarhus University Anders Clausen/

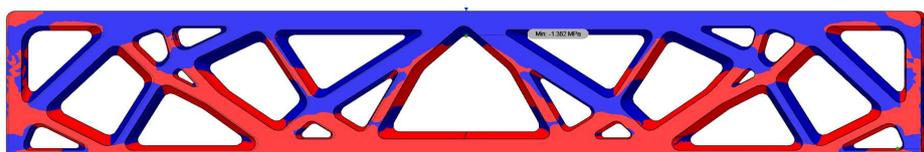
Exploiting Additive Manufacturing Infill in Topology Optimization for Improved Buckling Load

En la viga 5, simplificación de la viga 3, se pierde el acartelamiento de las secciones en volado hacia los extremos así como el traslape entre miembros, sin embargo su esquema más simple facilita su manufactura al situar en la geometría e inclinación óptima miembros rectos.



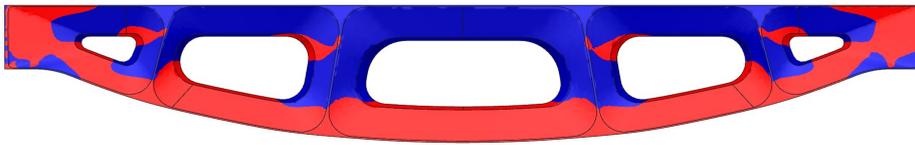
5 ELab propia 2 /Fusion 360, Abril 2020

En la viga 6 se aprecia como la bifurcación de un mismo miembro puede descomponer un vector de tracción, es frecuente la intersección entre miembros comprimidos y traccionados así como la consecución entre arcos y tirantes, sin embargo los miembros centrales cambian entre tracción y compresión en un espesor mínimo, lo que podría fomentar la aparición de grietas.

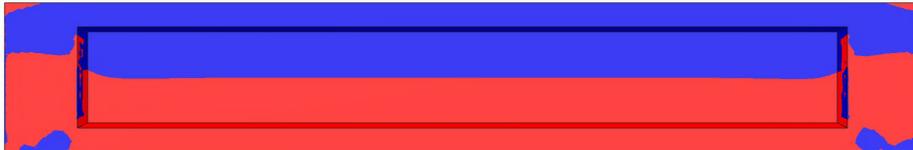


6 DTU P.Dombernowsky & A. Søndergaard / topologioptimering af betonkonstruktioner

La viga 7 sigue un esquema similar al de la viga dos, pero con una borde inferior que se acerca más a la forma del momento flector de la viga, esto permite miembros comprimidos más verticales. Al ser menos miembros estos son más robustos, pero reúnen en su espesor vectores tanto de compresión como de tracción generando tensiones en la unión con el borde superior.

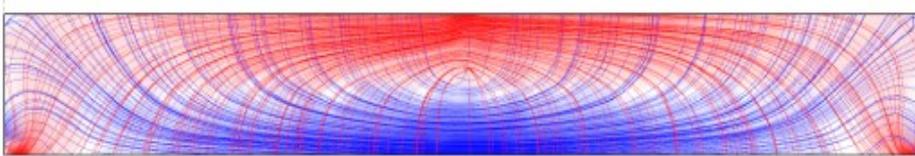


La viga 8 diseñada desde una sección doble T y 9 de geometría ortogonal al no subdividirse en trabéculas o miembros a su largo no presenta mayor complejidad en la forma que interactúan sus cargas, destacando solo como la viga ortogonal tiende a generar un arco de compresión en su interior.



Sin embargo esa simpleza es aparente y proviene de la continuidad del perfil de la viga y la carga homogénea, ya que el comportamiento de las cargas al interior de la viga si se pudiesen visualizar sus vectores sería similar al esquema inferior, que se asemeja más a los esquemas anteriores, generando arcos consecutivos desde los extremos y una serie de tirantes concéntricos (colores azul y rojos invertidos). Ante ello se concluye que diseñar la viga desde la normal (su elevación) se aproxima más a los vectores de fuerza dentro del elemento, permitiendo un mayor grado de eficiencia.

Bajo el mismo principio vigas y puentes de grandes luces tienden a reticularse y configurarse desde la unión de elementos discretos a lo largo, en lugar de mantener un mismo perfil extruido, que si bien puede ser más complejo de manufacturar permite reducir el peso de la estructura de forma considerable.



7 Technion Structural Optimization Research Group /

Simultaneous shape and topology optimization of pre-stressed beams

8 Viga doble T convencional

Similar a vigas prefabricadas convencionales.

9 Viga ortogonal convencional

Moda en estructuras monolíticas. Y estructuras 8x8 convencionales.

Comportamiento de fuerzas normales en viga simplemente apoyada

Computational Structural Design and Fabrication of Hollow-Core Concrete Beams

M.I.T – digital structures group Mohamed Ismail, Caitlin Mueller

Factor de Seguridad

El factor de seguridad informa cuantas veces más resistente es el elemento que la carga para la cual está diseñado, muestra en un mapa de calor las zonas fuera de riesgo (colores fríos) y las más críticas en su funcionamiento (colores cálidos), existiendo una correlación con las tensiones estructurales. No necesariamente significa que el elemento falle, sino que es una extrapolación representativa.

Se concluye que las zonas medias del borde inferior de la viga suele ser más solicitadas que los extremos, representadas en un mayor grosor, esto porque las tracciones se van sumando. Pueden entenderse como los tirantes que impiden que los extremos de cada arco se separe, al ser estos concéntricos se sobreponen uno sobre otro resultando en mayores fuerzas de tracción en la parte media, que naturalmente al ser la zona más alejada de los extremos es también la más solicitada.

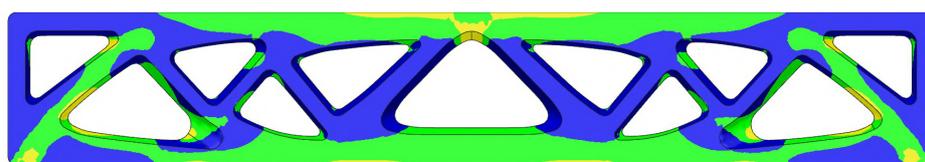
Se identifica como zona crítica los extremos superiores e inferiores, que podrían estar infra-dimensionados respecto a la carga que reciben, en contraste, los miembros al trabajar de forma colaborativa con un grosor similar parecen ser relativamente seguros.

Aun así los miembros más inseguros suelen ser los miembros laterales, mientras los miembros más cercanos a la mitad de la viga sugieren ser más seguros.

La viga 4, a comparación de la viga 1 es relativamente similar, diferenciadas por un alma central delgada que une permanentemente los bordes superiores e inferiores parece aportar a la integridad del elemento, reforzando miembros que podrían ser demasiado angostos o aportar resistencia ante cargas que no son estrictamente las que dieron origen al diseño.

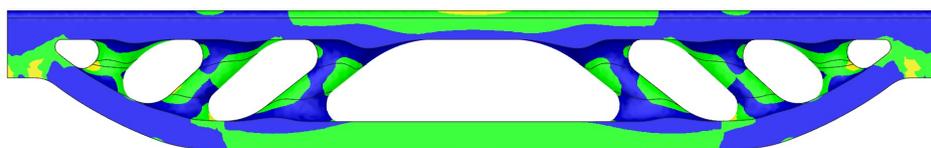
Este tipo de estrategia sería útil, por ejemplo en las vigas 2, 3 y 5, que al estar diseñadas para cargas homogéneas, su zona central puede ser vulnerable ante una carga puntual, para ello una costilla interior podría aportar resiliencia ante cargas inesperadas en el centro.

1 Aarhus University
Anders Clausen/
 Exploiting Additive
 Manufacturing Infill in
 Topology Optimization for
 Improved Buckling Load

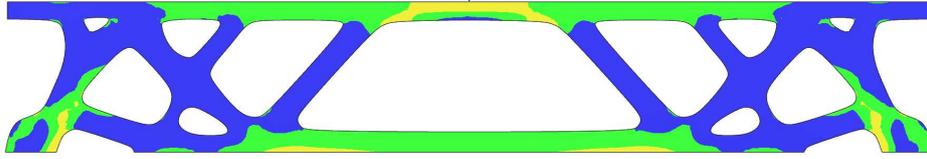


En la viga dos se aprecia dentro de los miembros un mayor factor de riesgo a comparación de la viga 7, de los mismos autores, en que dentro de ellos se distingue un vector más vertical (porción azul dentro del verde), sin embargo esto se corrige al tensar la porción inferior, anulando el vector horizontal de empuje dada la inclinación de los miembros.

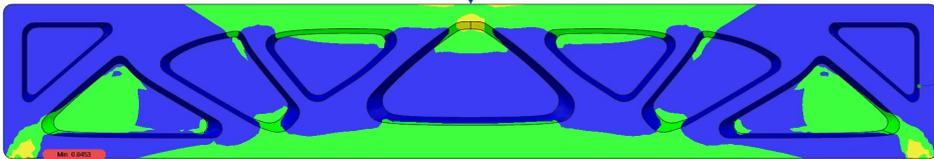
2 Technion Structural
Optimization Research
Group /
 Simultaneous shape and
 topology optimization of
 pre-stressed beams



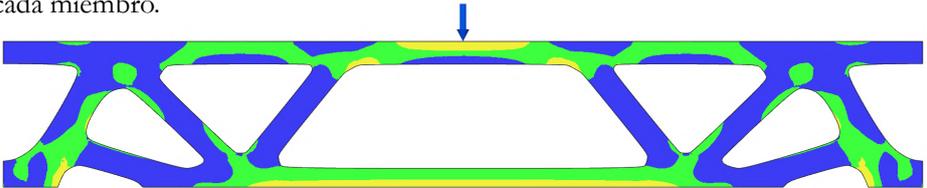
De la viga tres se observa como los bordes superiores e inferiores están infra-dimensionados en sus zonas centrales, respecto a los miembros, así mismo en la zona de la viga que recibe los apoyos.



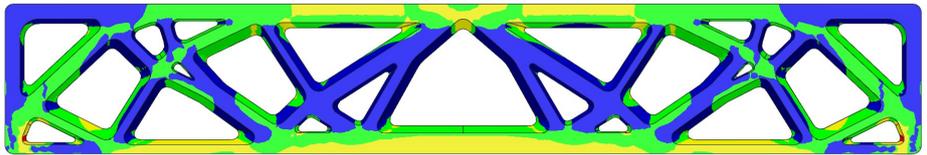
En la viga 4 se observa mayor riesgo en la zona cercana a los apoyos, que por su reducida área crea una carga perforante (puncture load) llama la atención la formación de un arco al interior del elemento y como el tabique interior hacia los extremos posee mayor riesgo de fallo.



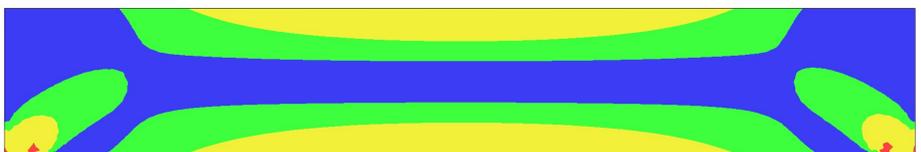
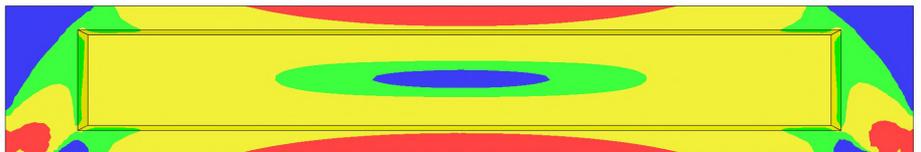
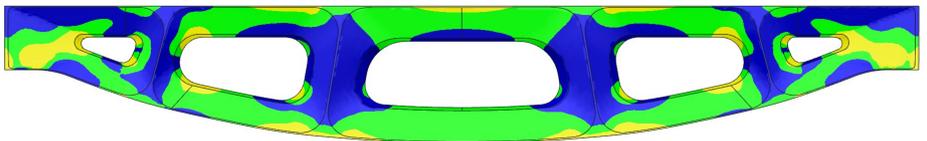
En la viga 5 se observa una mayor zona de riesgo en su área central al exponer un borde superior, que debiese aumentar en espesor, llama la atención la formación de arcos incluso al interior del borde superior, arrancando desde la parte superior de cada miembro.



La viga 6 expone mayor riesgo en las zonas comprimidas que las traccionadas, esto al exponer ante cargas homogéneas una viga diseñada para cargas puntuales.



La transición entre los apoyos y el borde inferior de la viga 7 está interrumpido por una zona azul (segura) próximo a los apoyos, esto explicaría la pérdida de masa en estas zonas en las vigas 3 5 y 6.



3 ELab propia 1 /Fusion 360, Abril 2020

4 Aarhus University
Anders Clausen/
Exploiting Additive
Manufacturing Infill in
Topology Optimization for
Improved Buckling Load

5 ELab propia 2 /Fusion 360, Abril 2020

6DTU P.Dombernowsky
& A. Sondergaard /
topologioptimering af
betonkonstruktioner

7 Technion Structural
Optimization Research
Group /
Simultaneous shape and
topology optimization of
pre-stressed beams

8 Viga doble T
convencional
Similar a vigas
prefabricadas
convencionales.

9 Viga ortogonal
convencional
Moda en estructuras
monolíticas. Y estructuras
8x8 convencionales.

-Tensiones normales (Plano XX)

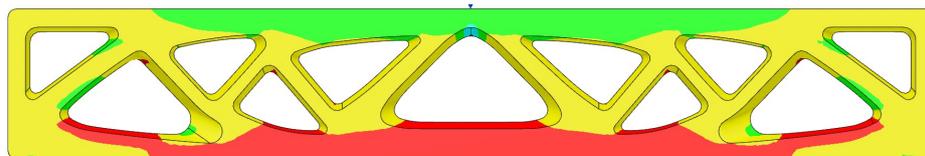
Las Tensiones en el plano XX, exponen las sollicitaciones en la elevación de la viga, acusando el recorrido de las fuerzas normales, ofrece datos similares a los expuestos en los factores de seguridad, ya que hay una correlación entre zonas tensionadas y su riesgo.

El análisis desde planos es una simplificación de las tensiones tridimensionales, sin embargo es apropiado en elementos delgados como las vigas simuladas, o por el contrario secciones dentro de un espesor indeterminado.

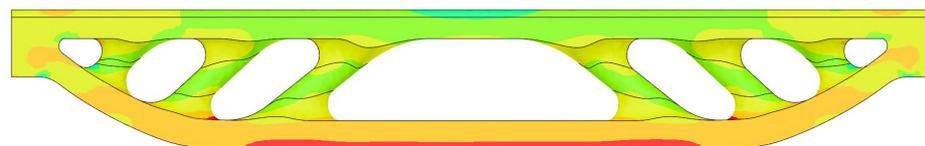
Al contrario de las zonas de riesgo en que colores más fríos representa menos riesgo y colores más cálidos mayor riesgo, la tensión en el plano está representado en un color amarillo como media, desde el cual colores más fríos como el verde o azul indican compresión y más cálidos como naranja y rojo indican mayor tracción.

La extrapolación de estos datos dio origen a los esquemas de tracción y compresión, discriminando de manera absoluta, sin embargo a continuación se aprecia que tan traccionados o comprimido está cada sección de la viga relativa al resto.

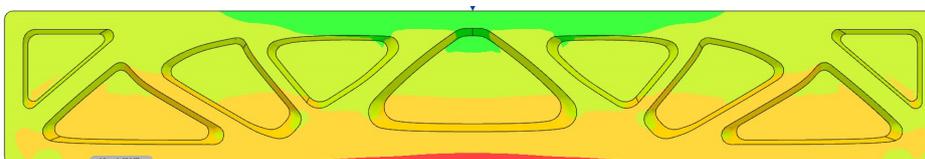
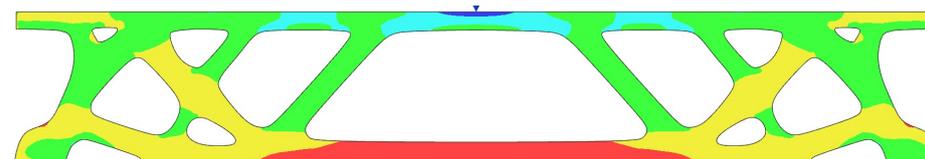
La viga 1 expone como el sistema de miembros centrales si bien varían entre compresos y traccionados está menos tensionado que los bordes superiores e inferiores en su zona central, sin embargo hacia sus extremos la tensión disminuye.



La viga dos expone como la parte superior central del borde inferior se comprime más que el resto del borde, posiblemente ante la luz que existe entre los miembros centrales.



La viga tres expone en mayor detalle como las tracciones de los miembros traccionados laterales se suman en un solo tendón en la zona inferior central, solicitándolo más respecto a otras zonas de la viga, llama la atención como las zonas en volado invierten el esquema de tracción y compresión, con mayor tracción en la parte superior y compresión en la inferior.

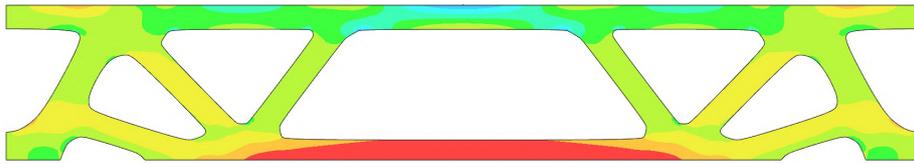


1 Aarhus University
Anders Clausen/
Exploiting Additive
Manufacturing Infill in
Topology Optimization for
Improved Buckling Load

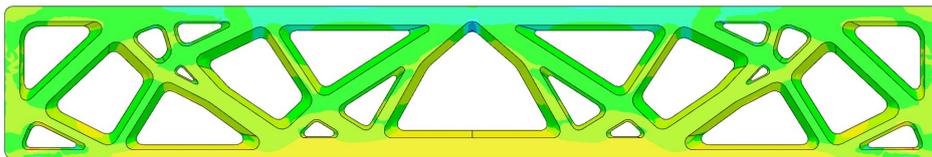
**2 Technion Structural
Optimization Research
Group /**
Simultaneous shape and
topology optimization of
pre-stressed beams

**3 ELab propia 1 /Fusion
360, Abril 2020**

4 Aarhus University
Anders Clausen/
Exploiting Additive
Manufacturing Infill in
Topology Optimization for
Improved Buckling Load

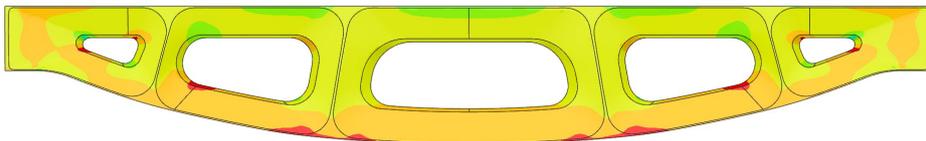


5 ELab propia 2 / Fusion
360, Abril 2020



6DTU P.Dombernowsky
& A. Søndergaard /
topologioptimering af
betonkonstruktioner

La viga siete no posee mayores variaciones en su borde inferior conforme al momento flector que le da forma, sin embargo las zonas que reciben los miembros son notoriamente traccionadas en su borde inferior, indicando una tendencia a fallar primeramente en esas zonas.



Tensiones de Von Mises

La tensión de Von Mises es un aproximado de todas las tensiones dentro del componente, no solo tomando en cuenta un plano, sino su tridimensionalidad (ejes X, Y, Z).

En el caso de las simulaciones, Indica zonas de potenciales roturas, las que tienden a surgir en transiciones abruptas entre geometrías o con radios muy pequeños, al concentrar tensiones en un solo punto. En contraste, las transiciones graduales o más suaves con radios mayores parecen distribuir dichas tensiones de manera exitosa al hacer uso de un mayor perímetro, similar a como las ventanas en barcos y aviones son redondeadas, para evitar puntas y por tanto tensión material desde los que se podría iniciar una "rajadura".

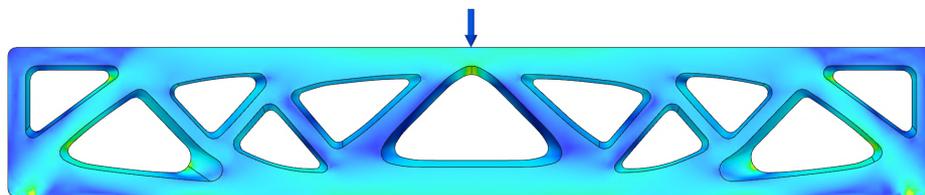
También se identifica tensión en la zona central de vigas con mayor espacio entre miembros (Vigas 4 y 5) que al estar optimizadas para cargas homogéneas en lugar de puntuales ven flexiones en su delgado borde superior, ante ello se ve como solución el uso de costillas o alma central, como se indicó en el apartado de factor de seguridad.

Se identifica tensión en los vértices interiores de la viga cuando sus paredes se angostan demasiado, como consecuencia de adaptar las geometrías a formas manufacturables en moldes, incluso cuando se implementan radios mayores, ante ello una posible solución es no terminar la cara exterior en una línea sino en una cara delgada, así como no dejar "filos" interiores como en el caso de la viga 1 sino una sección media recta o de menor inclinación como es el caso de la viga 7.

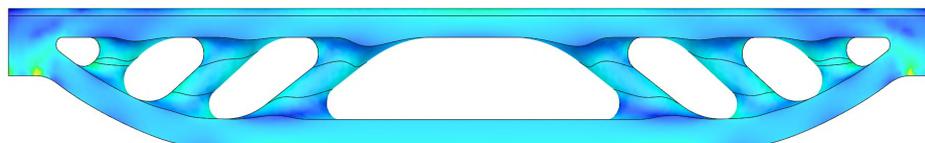
La mayor cantidad de tensión se concentra en las zonas de apoyo, al repartir las fuerzas recibidas por la viga en un área demasiado pequeña, acercándose a una "carga

de punción” (puncture load), una posible solución es aumentar el área del apoyo, ya que por redondear los extremos se vio disminuida.

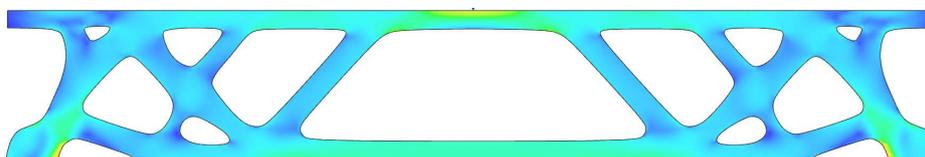
**1 Aarhus University
Anders Clausen/**
Exploiting Additive
Manufacturing Infill in
Topology Optimization for
Improved Buckling Load



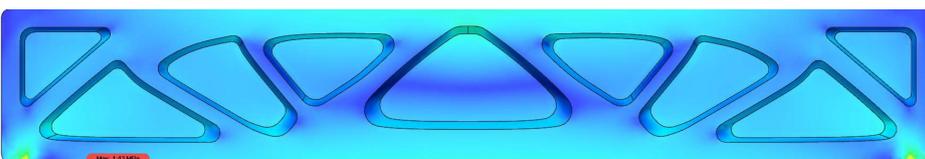
**2 Technion Structural
Optimization Research
Group /**
Simultaneous shape and
topology optimization of
pre-stressed beams



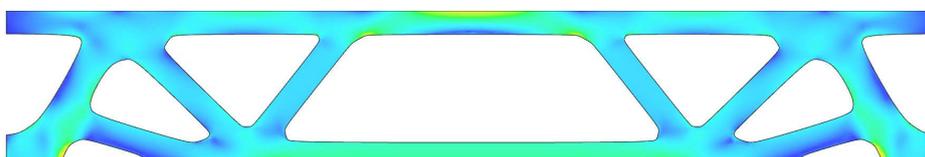
**3 ELab propia 1 /Fusion
360, Abril 2020**



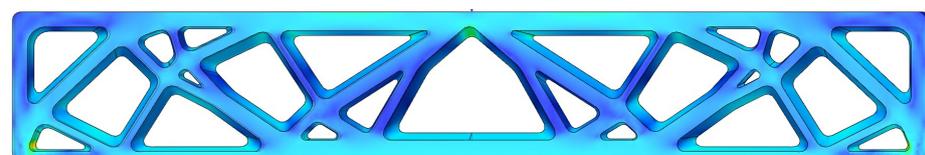
**4 Aarhus University
Anders Clausen/**
Exploiting Additive
Manufacturing Infill in
Topology Optimization for
Improved Buckling Load



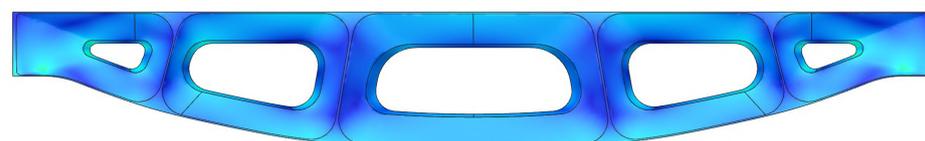
**5 ELab propia 2 /Fusion
360, Abril 2020**



**6 DTU P.Dombernowsky
& A. Søndergaard /**
topologioptimering af
betonkonstruktioner



**2 Technion Structural
Optimization Research
Group /**
Simultaneous shape and
topology optimization of
pre-stressed beams



Observación:

El análisis de elemento finito es útil para comprender el funcionamiento y principios estructurales de cada viga, sin embargo a la hora de obtener la resistencia final de cada elemento, el programa tiene una serie de limitaciones, principalmente ligado a que el hormigón no es un material lineal o elástico como el acero o plásticos, eso hace que la más mínima grieta o “picadura” en el elemento sea interpretado como

un fallo estructural, aún lejos de su resistencia final, por ello el valor máximo de resistencia se extraerá de las pruebas de laboratorio, sin embargo logra poner en evidencia relaciones entre desempeño estructural y masa.

El análisis trabaja con un aproximado de las resistencias de tracción y compresión del hormigón, por lo que la resistencia real desde la ubicación de los refuerzos solo se dará a conocer en las pruebas de carga.

Para el sistema estructural se ha optado por el esquema de la viga número dos, ante su eficiencia estructural y la claridad de su perfil acorde al diagrama de momento flector de la viga, separando fuerzas de tracción y compresión en cada miembro, evitando tensiones mayores en su interior. El borde inferior al ser un único tendón que inicia en los apoyos, evita ganar altura desde elementos secundarios más frágiles.

N	Elevación	Estrés Max	Factor Seguridad	Volumen	Masa	Coficiente Factor/Vol	Co2	Rank	Comentarios
1		1,3 MPa	3,2	9.680 cm ³	23,23 kg	3,3	12,57 Kg	5°	
2		0,9 MPa	3,85	7.722 cm ³	18,5 kg	4,98	10 Kg	1°	
3		1,27 MPa	3,4	8.920 cm ³	21,4 Kg	3,81	11,58 Kg	3°	
4		1,42 MPa	3,52	11.350 cm ³	27,24 Kg	3,1	14,74 Kg	6°	
5		1,1 MPa	3,1	8.215 cm ³	19,71 Kg	3,78	10,7 Kg	4°	
6		2,03 MPa	2,74	9.813 cm ³	23,6 Kg	2,8	12,8 Kg	7°	
7		1,22 MPa	3,18	6.700 cm ³	16.080 Kg	4,7	3,6 Kg	2°	
8		1,6 MPa	3,43	12.520 cm ³	30,48 Kg	2,74	16,5 Kg	8°	
9		1,15 MPa	4,45	16.715 cm ³	40,1 Kg	2,6	12,57 Kg	9°	

B) Resultados / Prototipos Físicos

Los resultados en la etapa de prototipos físicos se componen de la etapa de desmoldaje en la discusión de medios de producción y la prueba física de carga sobre las vigas.

A pesar de haber diseñado los moldes con la intención de ser reutilizados, la espuma de poliéster extruido rígido de la que fueron hechos absorbió agua de la mezcla de hormigón, haciendo que se expanda, imposibilitando su extracción en una sola pieza. Sin embargo una de las estrategias geométricas de desmoldaje correspondiente a la viga 7 no falló, presumiblemente al tener gran parte de sus superficies inclinadas. Esta estrategia, basada en la transición geométrica (o loft) entre perfiles externos e internos de la viga fue adoptada en el diseño de viga final del sistema estructural, luego de probar su éxito en esta etapa de prototipado físico.

Arriba:
Tabla de comparativa de análisis FEA
Elaboración propia

El desempeño estructural de los prototipos físicos de vigas serán puestos a prueba en el laboratorio de prototipos del departamento de ingeniería estructural y geotecnia UC, equipado para el ensayo estático de estructuras, ejerciendo una carga homogénea mediante una prensa hidráulica y cuantificando tensiones y desplazamiento por medio de sensores a lo largo de la viga.

Hasta entonces, la experiencia de prototipos físicos ha probado que es posible manufacturar elementos complejos, explotando la plástica del hormigón por medio de moldajes de geometría específica acorde a las exploraciones propias y de autores.

La elaboración de estos elementos busca discutir la forma actual de diseñar y construir estructuras de hormigón en Chile, que en su abstracción geométrica y ortogonalidad no recoge el comportamiento de las cargas en su interior al nivel que la plástica del hormigón permite, sino que responde a facilidades de diseño y construcción en obra.

Medios digitales de fabricación, en esta caso una fresadora CNC fue necesario en la traducción de geometrías digitales a elementos físicos, sin embargo se distancia de otros medios de producción explorados en investigaciones de O.T en que está integrado en las líneas de producción nacionales, al ser frecuente el uso de moldes metálicos hechos en CNC para partes especializadas, y estar pensado fundamentalmente desde la repetitividad, explotando la plástica del hormigón como medio de producción masivo.

De esta forma, la costosa manufactura de la geometría se hace una sola vez, sacando múltiples copias, en oposición a fabricar la geometría del elemento cada vez que este se repite, como es el caso de moldajes perdidos o impresoras 3D de hormigón.



Derecha:

Prototipos físicos a medio desmoldar, parcialmente fuera de los moldajes para acelerar su frague.

120 cm

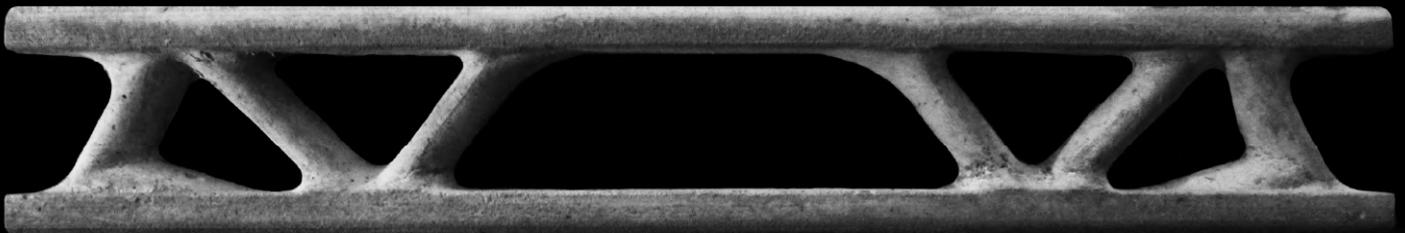
Viga 1, Esquema basado en investigaciones de E.Shakour y O.Amir / Moldaje por transición geométrica de cavidades y nervaduras exteriores



Viga 2, Esquema basado en investigaciones de Shakour y Amid / Moldaje por superficies curvas en trabéculas



Viga 3, Esquema basado en exploraciones propias de Fusion 360 / Moldaje por superficies curvas en trabéculas



Viga 4, Esquema basado en investigaciones de P.Dombernowsky & A. Søndergaard / Moldaje por biselado de caras interiores



Viga 5, Esquema basado en investigaciones de Anders Clausen / Moldaje por biselado de caras interiores y tabique interior en alma central



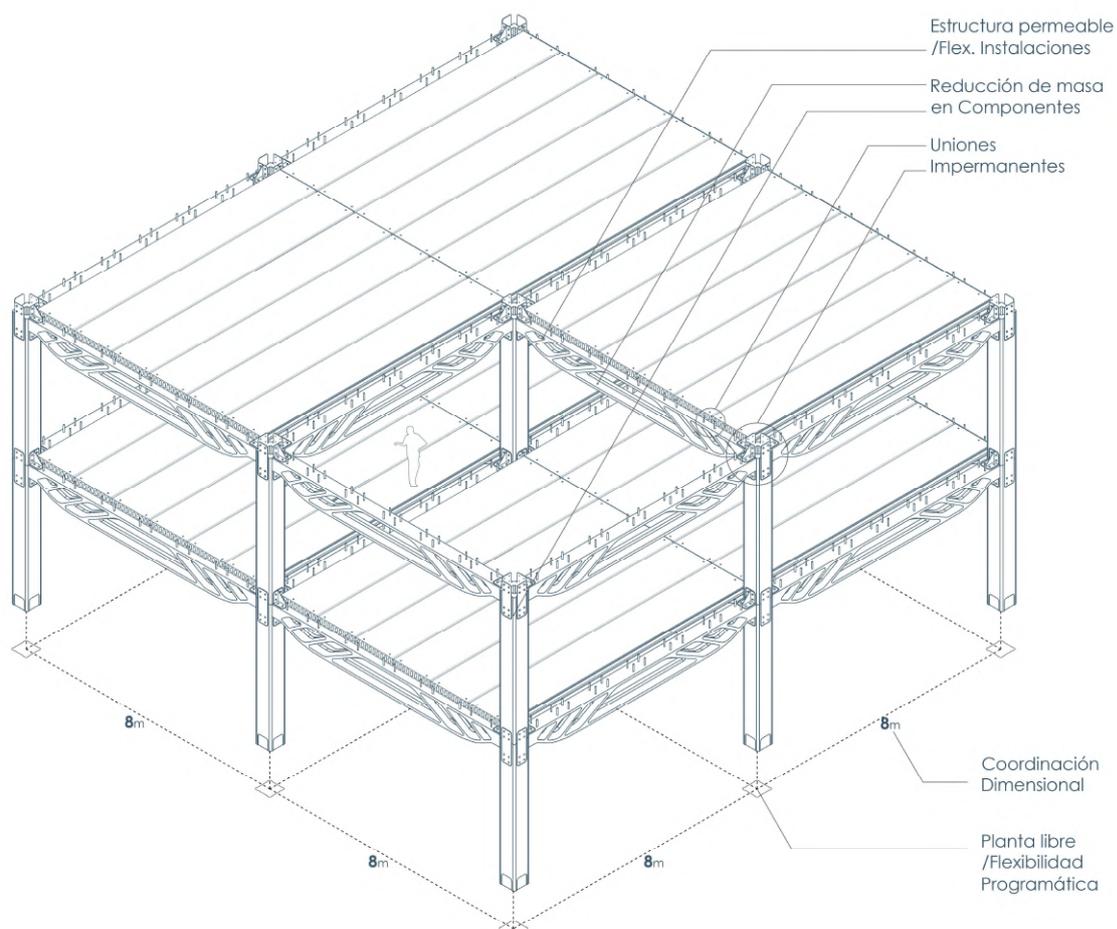
Sistema estructural y proyecto

Los resultados obtenidos desde los diversos frentes de la investigación se han traducido a rasgos de diseño en un sistema estructural propuesto, con una morfología que a grandes rasgos emula a las construcciones 8x8 existentes, pero que integra un diseño de unión impermanente como respuesta a la demolición convencional y una resistencia desde la geometría como respuesta a la resistencia comúnmente obtenida desde la cantidad de masa.

Toma en cuenta criterios de flexibilidad en su layout estructural de planta libre así como en la permeabilidad de sus vigas, que permite pasar instalaciones a través de sí a la vez de adquirir un mayor momento flector. El diseño de unión además de posibilitar el desensamblado en lugar de la demolición también permite modificaciones en etapas intermedias del ciclo de vida del edificio, adaptando su volumetría a nuevos usos, normativas o cambios programáticos.

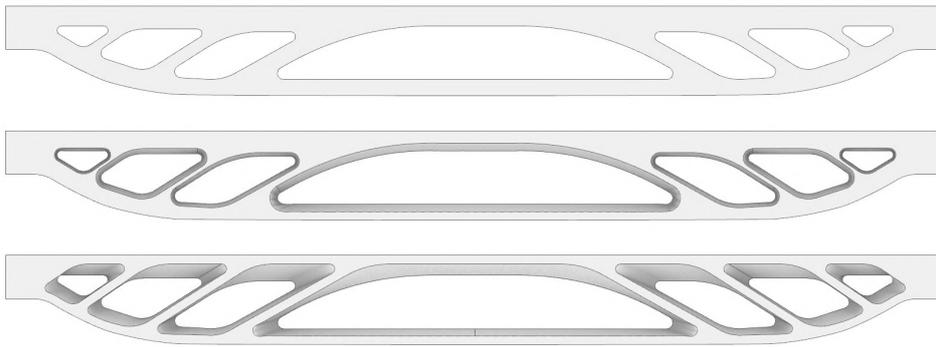
Axonométrica de Sistema estructural propuesto

Elaboración propia



Que forma tiene?

El diseño de viga ha sido el resultado de una serie de iteraciones y exploraciones tanto propias como de autores por hallar una geometría óptima ante el escenario de cargas al que se somete, con modificaciones que integran a su geometría rasgos que permiten su fabricación en masa por medio de moldes reutilizables, al angostarse hacia sus caras exteriores (draft) que además aporta un lenguaje formal de esbeltez, de los diferentes rasgos geométricos posibles para moldear se ha elegido el más exitoso en las pruebas de prototipos reales.



La permeabilidad de la viga no solo quita masa donde no aporta sino que también permite pasar instalaciones a través de sí. En oposición a la riesgosa práctica de perforar vigas monolíticas o pasar instalaciones bajo las vigas.



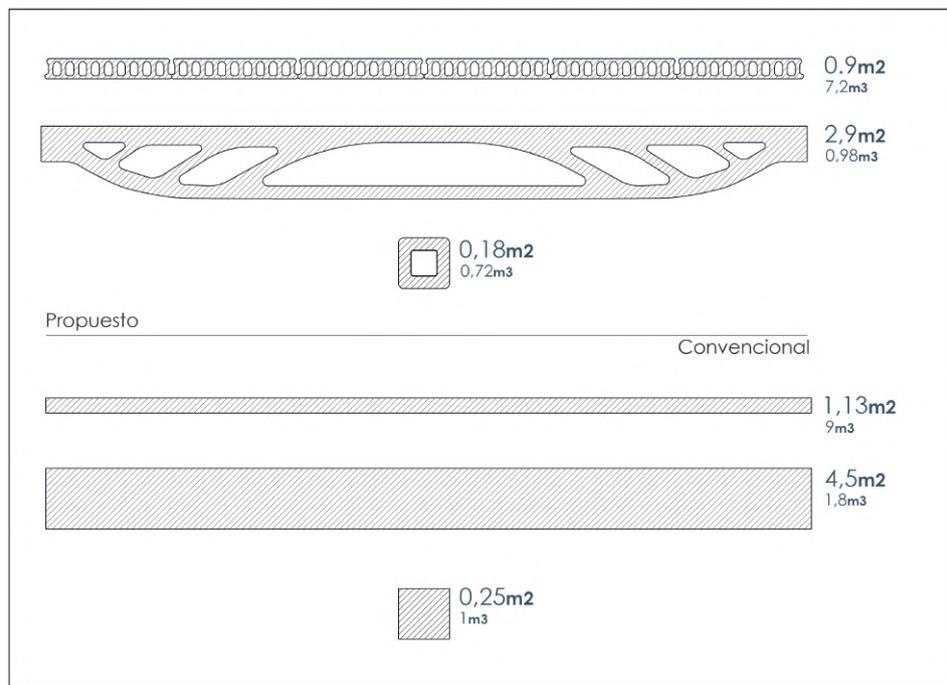
Los pilares también han sido optimizados, al situar masa en sus bordes, donde el momento de pandeo (buckling moment) es mayor, ahuecando su interior conforme a las exploraciones de O.T hecha en pilares y la literatura¹⁵ que explora el desarrollo de columnas huecas de hormigón en zonas sísmicas.

Evolución de perfil de Viga

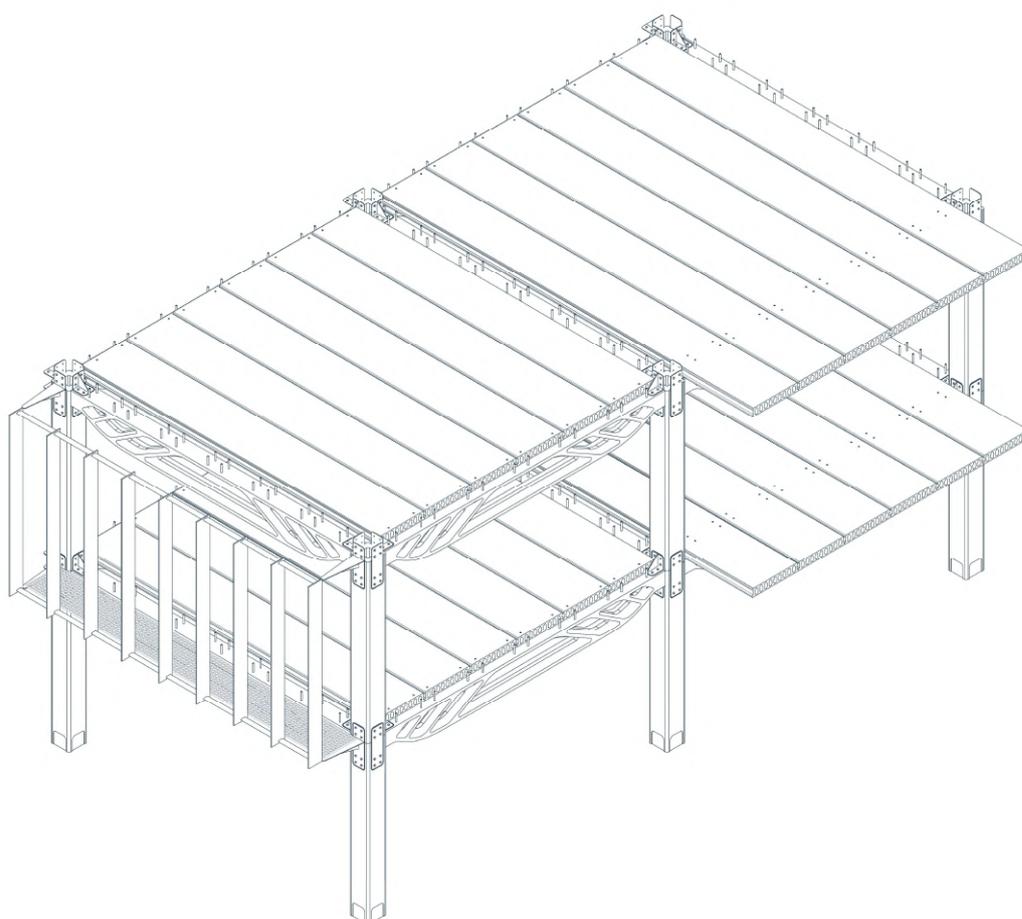
Adaptación desde esquema bidimensional a geometría manufacturable por moldeo

Vanos de viga permeado por instalaciones

Elaboración propia



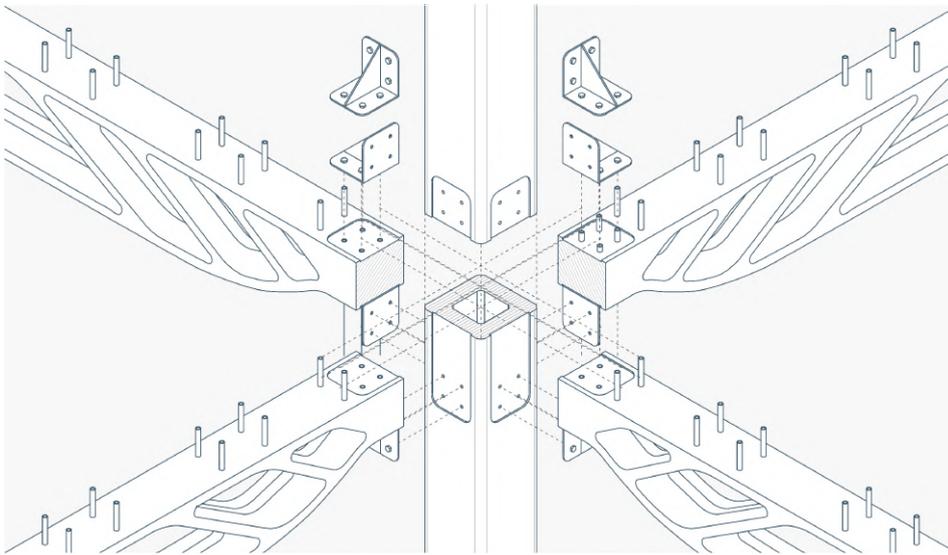
Cuadro comparativo:
Secciones de componentes constructivos propuestos V/S convencionales
Elaboración propia



Axonométrica
Variaciones en sistema estructural propuesto, volado de vigas pretensadas e integración de ménsulas para envoltentes

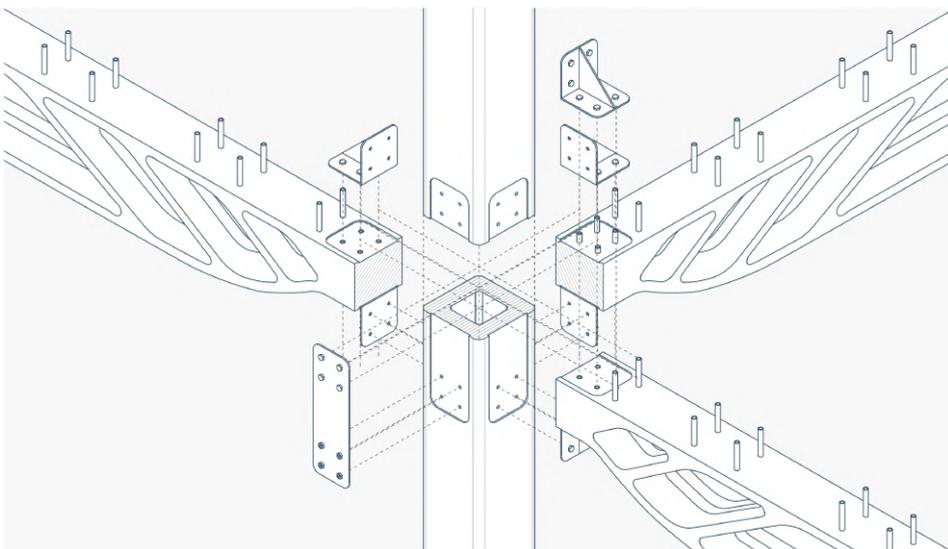
Como se conecta?

El diseño de uniones toma los principios explorados por Dhakal y Aninthaneni consistente en escuadras de acero apernadas que resuelven el encuentro de los elementos constructivos, con propiedades mecánicas similares a la de una construcción convencional de marcos rígidos monolíticos, conecta las vigas optimizadas con una columna ahuecada, no solo transmitiendo las cargas de peso sino también momentos de torsión. Su carpintería es recibida por canchales en las piezas de hormigón y las perforaciones al interior de los componentes están protegidas por una camisa metálica que rodea los pernos, evitando que dañen el resto de la pieza.



Axonométrica explotada
detalle de unión entre 4
vigas y un pilar
Elab propia

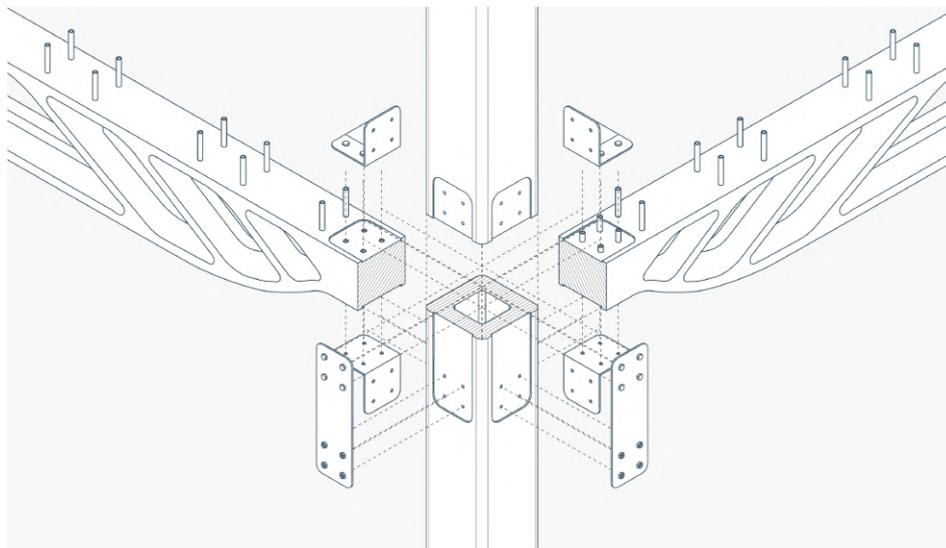
El diseño de unión se puede adaptar a diferentes situaciones, como el encuentro de 4 vigas al interior de la planta del edificio, el encuentro de 3 vigas en los bordes de las planta hacia la fachada, con una placa de terminación hacia el exterior.



Axonométrica explotada
detalle de unión entre 3
vigas y un pilar
Elab propia

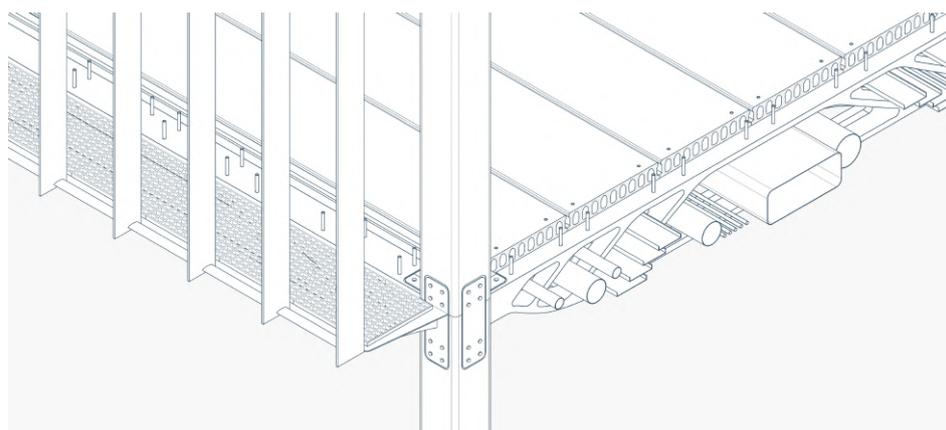
El encuentro de dos vigas, en las esquinas de la planta se resuelve con dos placas de terminación hacia el exterior que además de recibir los pernos que fijan las vigas al otro lado, estabiliza la unión entre pilares junto a las escuadras.

Conforme a las mismas investigaciones de Dhakal y Aninthaneni, la unión entre vigas y losas es resuelta por una serie de conectores huecos con hilado interior que cruzan las losas y son apernadas desde su parte superior a la viga.



Axonométrica explotada
detalle de unión entre 2
vigas y un pilar
Elab propia

La placa exterior puede también ser interfaz con otros elementos, como integrar una ménsula que de soporte el sistema de envoltentes además de sostener el grating de piso para circulaciones de mantenimiento exteriores.



Detalle unión
Integración de ménsula
para envoltentes en
conector estructural.

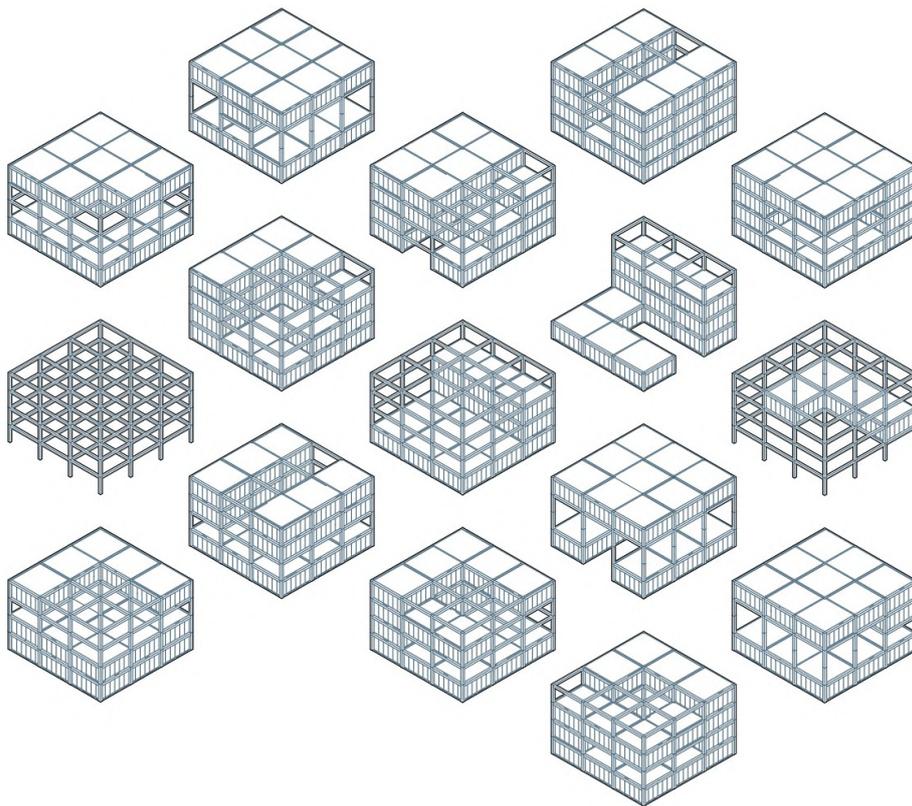
El sistema estructural propuesto no pretende resolver todo el edificio, sino que busca resolver solo aquellas partes comunes a demás edificaciones; su grilla estructural. Llevando la construcción de las partes repetibles desde la faena tradicional a la industria, donde pueden ser controladas y optimizadas, cuya economía descansa no en una numerosa mano de obra barata sino en la escalabilidad y velocidad. Sin embargo, toma lecciones de otros sistemas prefabricados históricos al no negar por completo la construcción en obra ni las variaciones en diseño y escala que puedan existir bajo esta tipología en diferentes proyectos al dejar abiertos el diseño de envoltentes, particiones interiores y circulaciones.

Estructura y espacialidad

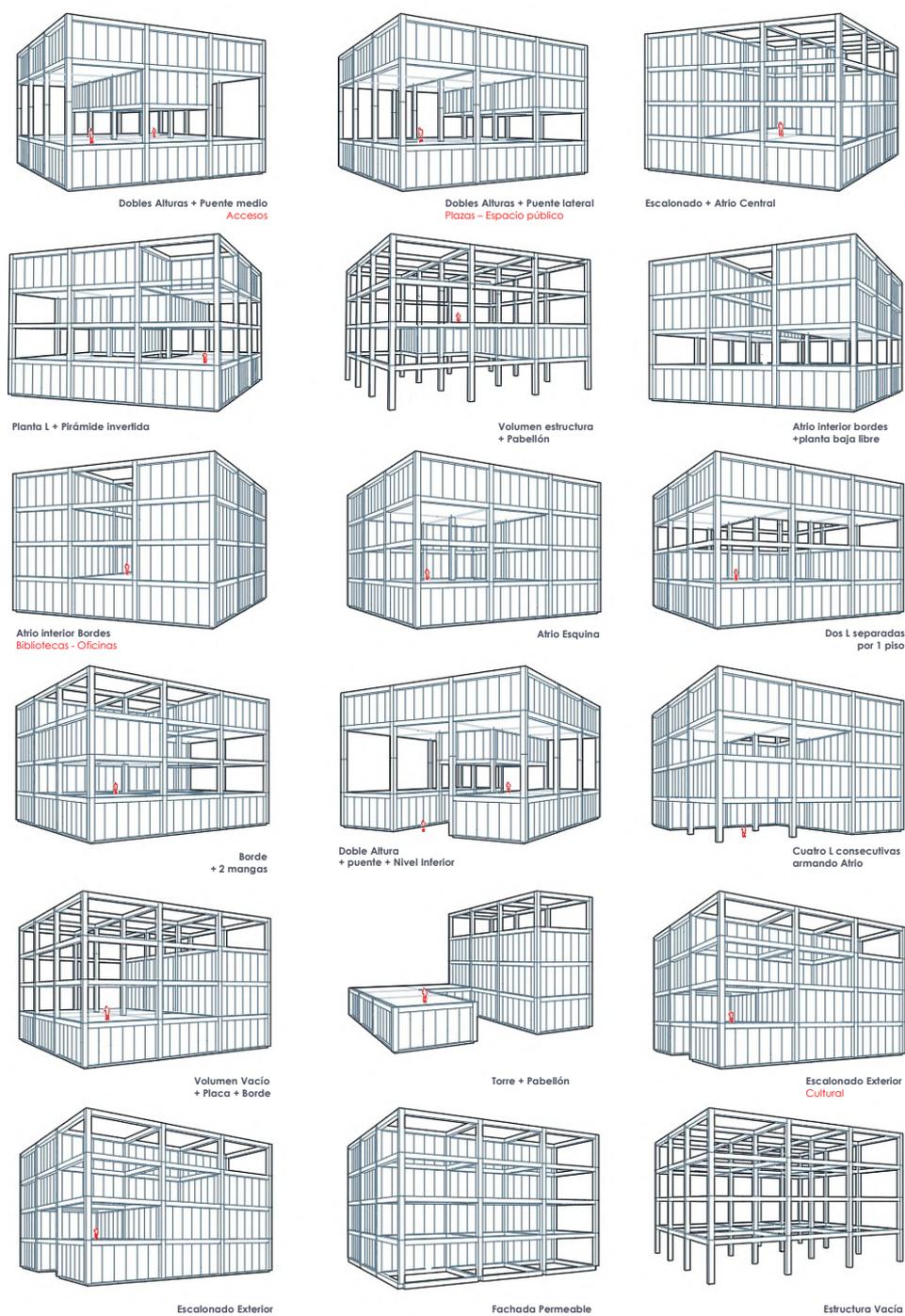
La morfología de viga y pilar propia de la tipología 8x8 adoptada por el sistema estructural propuesto, no solo es flexible en términos de variabilidad programática y permeabilidad estructural para instalaciones/sistemas, sino que se propone también como una matriz estructural, capaz de contener unidades tanto de lleno como de vacío, las cuales se pueden permutar para configurar diversas espacialidades.

De esta manera se puede comprender también como un sistema espacial en que la expresión del edificio no se separa de la solución estructural.

Los ejemplos a continuación fueron armados desde una matriz de 3x3x4 módulos, de la que se rescataron 16 “maquetas” con una espacialidad clara o propositiva. Se puede inferir que ante estructuras más grandes que contengan una mayor cantidad de módulos el número de combinaciones/permutaciones posibles crece de forma exponencial, abarcando un gran número de espacialidades posibles bajo una sola matriz de marcos y vigas.



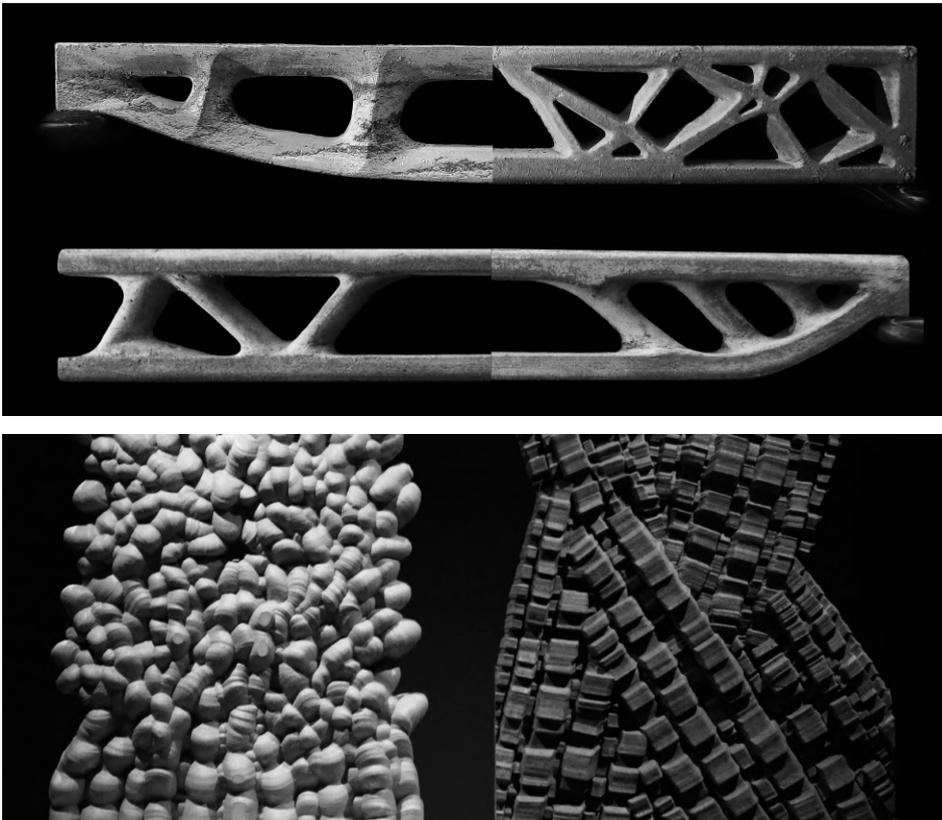
El sistema estructural propuesto no solo lograría flexibilidad en planta para conciliar diversos programas, sino que en sus tres dimensiones puede proponerse como un armazón capaz de sostener diferentes geometrías.



A la espacialidad general que se configura desde la trama estructural, se suman espacios aún más específicos que pueden configurarse desde elementos secundarios independientes de la estructura respondiendo a las necesidades de cada programa y con posibilidad de variar en el tiempo.

Si bien lo que condujo la exploración geométrica de los componentes fue una objetiva optimización de la eficiencia estructural, los objetos resultantes poseen una dimensión formal y escultórica que en su propia escala cualifican el espacio. Esta dimensión había sido ignorada hasta la elaboración de prototipos físicos, los que por sí solos dieron cuenta de su materialidad y plástica.

La repetición de componentes con estas características en un espacio influye en la forma que se percibe, desde su permeabilidad a la luz e instalaciones hasta la filigrana y complejidad formal que contrasta con la abstracción geométrica de vigas y pilares ortogonales.



Semper y Frampton explican en sus discusiones que elementos como el capitel iniciaron como una solución constructiva y estructural que luego formó parte del lenguaje arquitectónico, soportando al edificio simbólicamente y en términos de composición desde el detalle y ornamento. Acorde a las ideas de Adolf Loos, las nuevas tecnologías constructivas que permiten abstraer las estructuras hacen de los detalles y filigranas una complejidad innecesaria.

Ante la actual abstracción y ortogonalidad de vigas y pilares, la complejidad formal en las estructuras podría volver a aparecer, esta vez no en forma de ornamento u elemento compositivo, sino como la expresión misma de la estructura, resultado de reducir la cantidad de masa en cada elemento comprendiendo el comportamiento de las fuerzas en su interior, en respuesta a la necesidad de reducir la cantidad de recursos destinados a construcción.

Abajo:
Piezas sin nombre,
exposición Piedra negra
Federico Assler

El traspaso de las experimentaciones de esta investigación es inductivo hacia el proyecto de arquitectura. En un ejercicio proyectual que es inverso al convencional, va desde lo particular a lo general: Del escantillón y el detalle al componente, pasando por el sistema estructural, espacio y finalmente al proyecto de arquitectura completo, articulando los componentes depurados en esta investigación en una forma convencional conforme a la tipología 8x8 estudiada.

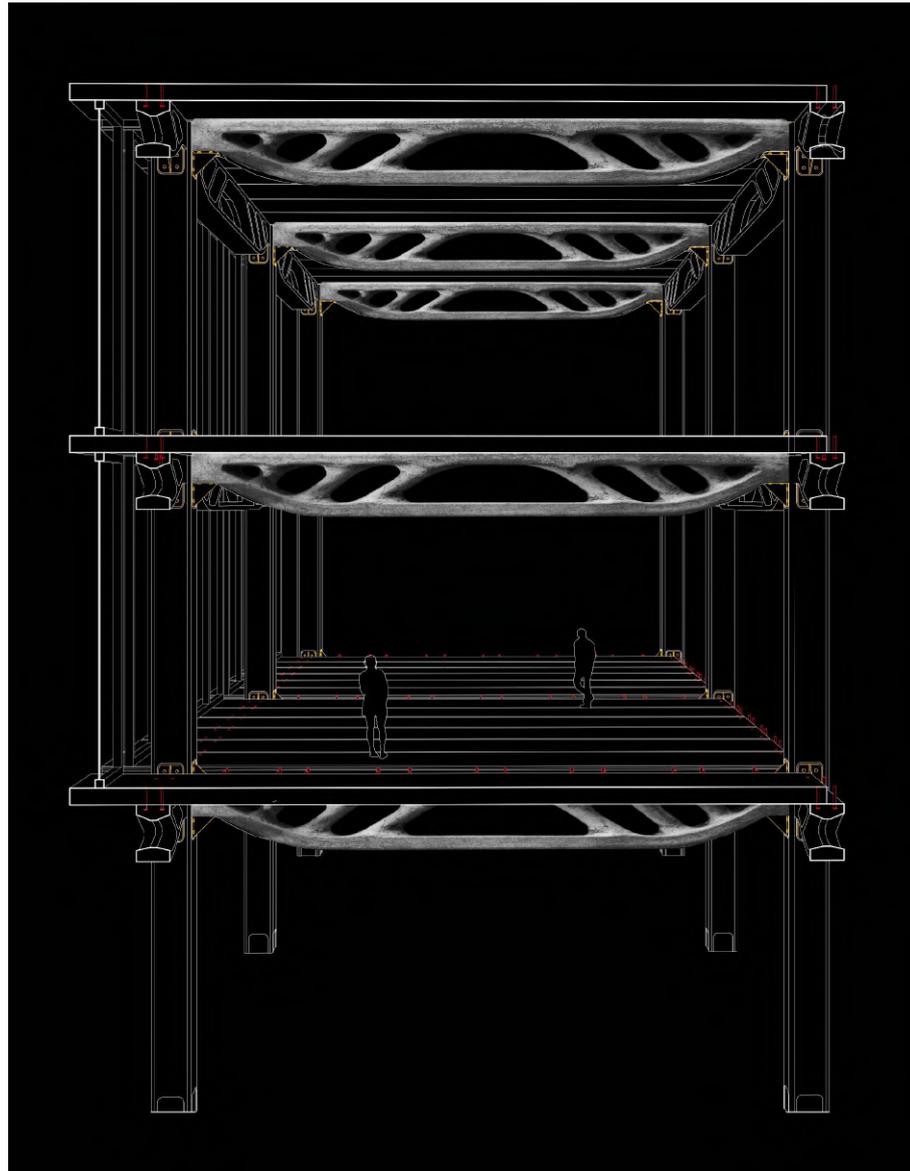


Imagen objetivo interior

Espacialidad del sistema estructural desde su interior:

Contrario al recurrente ejercicio de Optimización topológica en arquitectura de reunir elementos simples de maneras complejas, la concepción desde componentes uno de forma simple y convencional elementos complejos, que en su repetición genera espacialidades de fácil lectura pero cargadas de complejidad en un segundo orden de lectura, a una escala menor que la espacial; la del detalle.



Imagen objetivo interior

Espacialidad del sistema estructural desde su interior: O.T a escala de componente

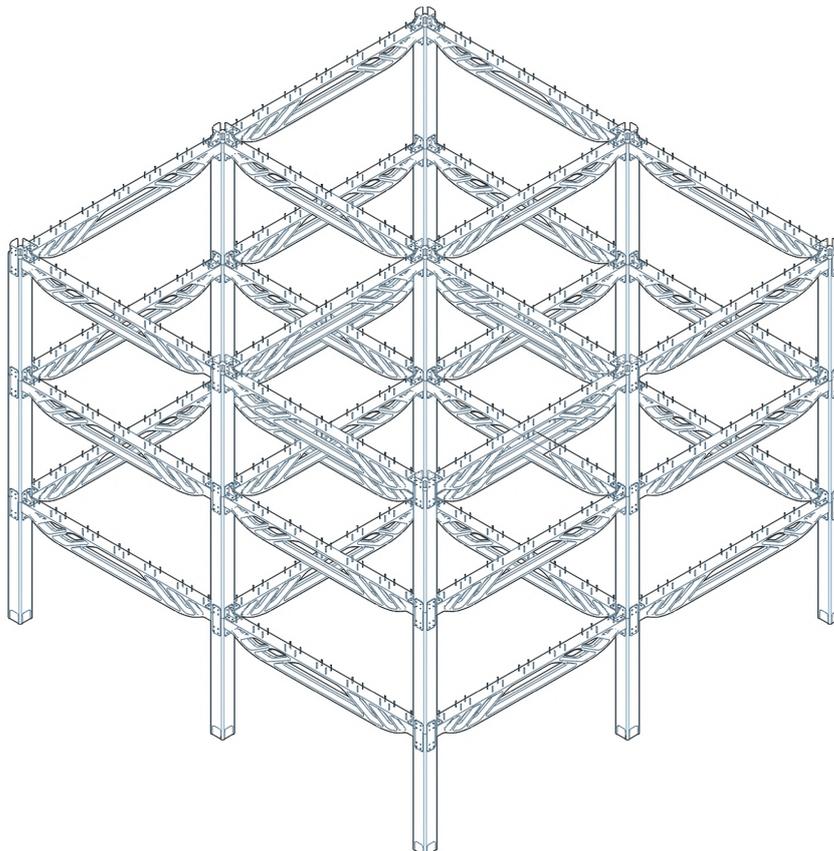


Qatar national Convention Centre

Arata Isozaki,
Ejemplo de O.T a escala de edificio

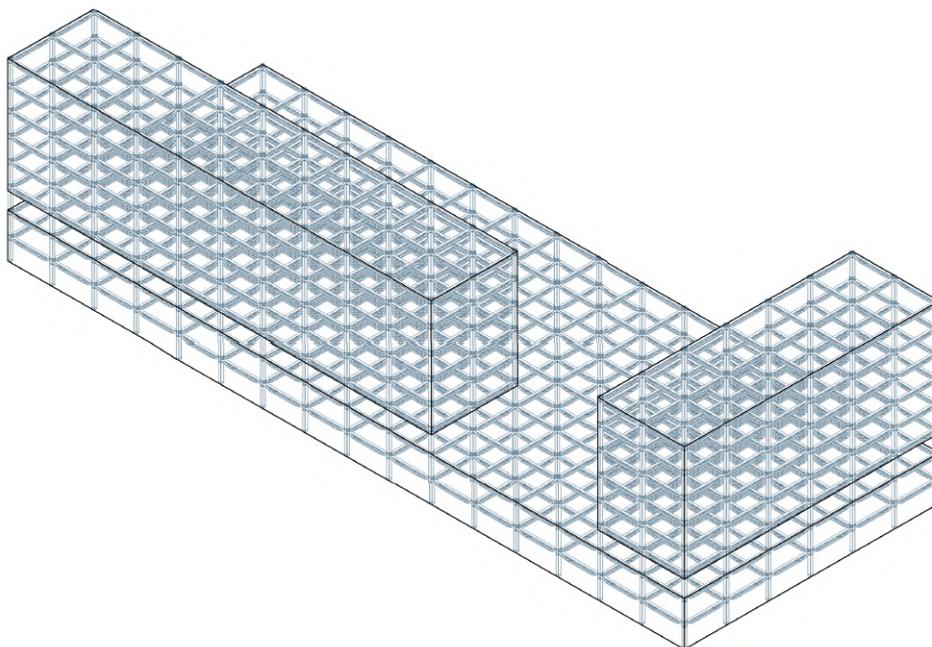
La concepción del proyecto desde sus componentes permite una proposición desde su sistema estructural; del diseño de la unidad hasta la configuración completa que responde a las condiciones del emplazamiento.

El proyecto se plantea como infraestructura neutra y permeable, capaz de evolucionar en el tiempo y resistir a la obsolescencia, sobre ella se pueden configurar llenos y vacíos, programa y espacio público.



Matriz estructural de 2x2x3
Sistema estructural propuesto

El proyecto se presenta como una matriz estructural flexible de la misma extensión que su emplazamiento, capaz de contener diversos programas y evolucionar en el tiempo conforme al desarrollo futuro de su contexto.



Matriz estructural proyecto
17x6x8 módulos

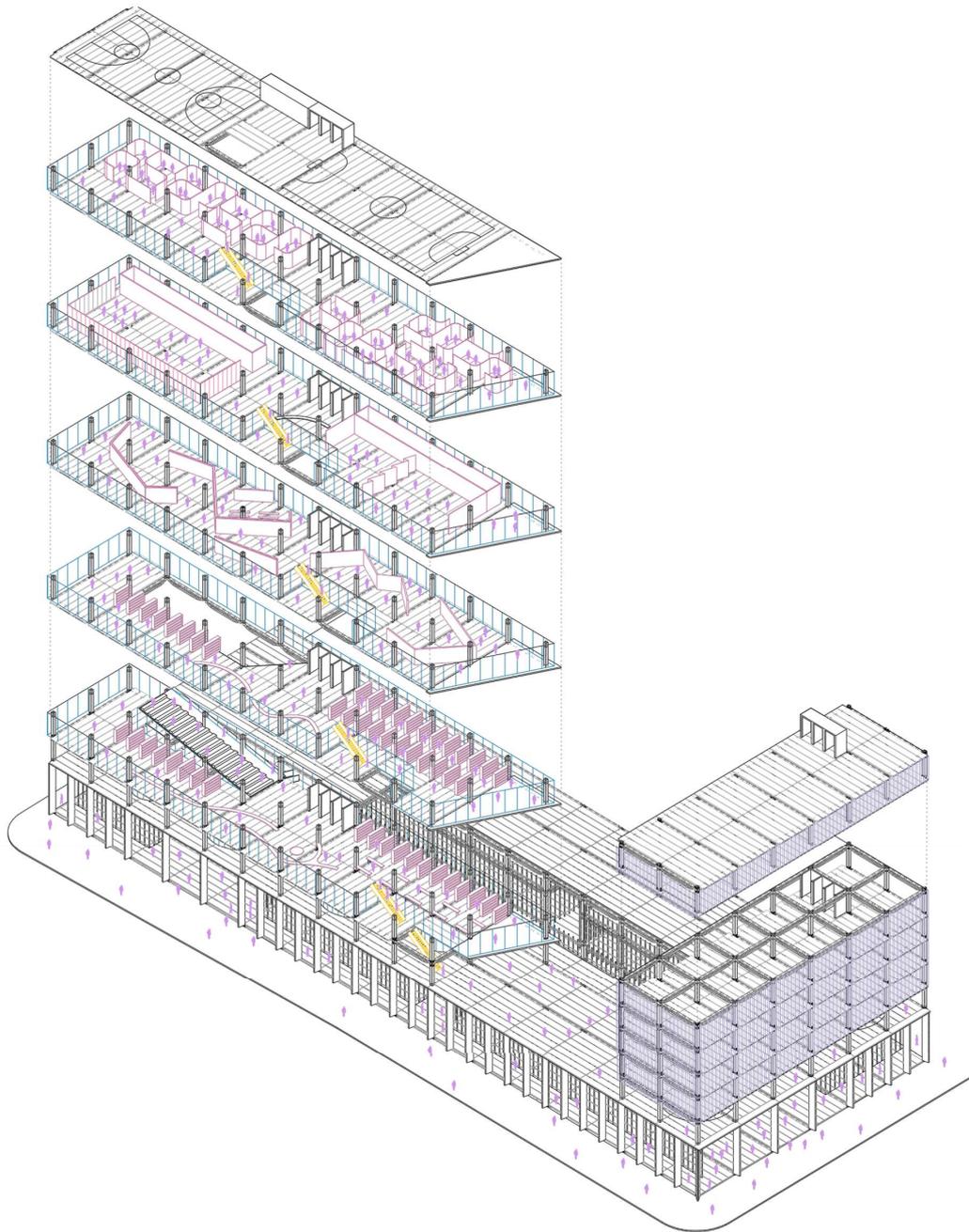
El proyecto recoge la frecuente implementación de la tipología 8x8 en proyectos comerciales y de servicio, configurando un núcleo de infraestructura que responde a la necesidad de los subcentros de Santiago por mayor equipamiento e independencia del centro de la ciudad y su cono nor-oriente.

Su matriz de 17x6x8 módulos cobra una escala metropolitana que responde a las importantes piezas urbanas que confluyen en su emplazamiento frente a la plaza de armas de Maipú, como la intersección de Avenida Pajaritos y 5 de Abril y ser uno de los bordes que contienen la plaza y macromanzana municipal.

Sus dimensiones también responden a la constructibilidad recientemente actualizada y a la escasez de programa cultural para la segunda comuna más poblada del país, que además es puerta de acceso para la conurbación del surponiente de la ciudad, compuesta por Padre Hurtado, Peñaflor y Talagante.



Emplazamiento
Piezas urbanas relevantes



Isométrica explotada
Exposición de estructura y programa

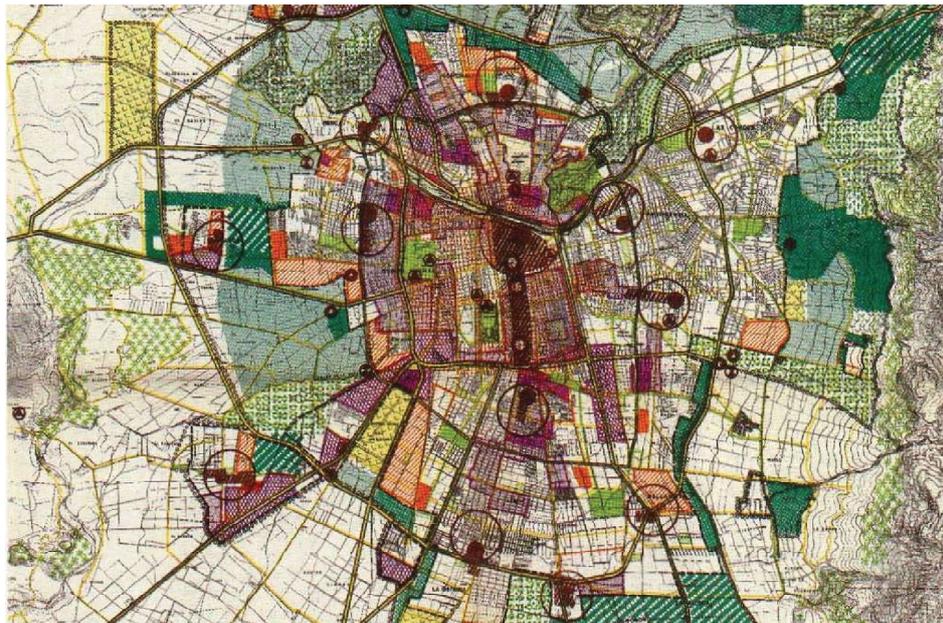
La plaza de Maipú es un nodo más dentro de un circuito de 11 subcentros al interior de la ciudad que el plan regulador metropolitano (PRM92) busca desarrollar por medio de proyectos de equipamiento desde la década de los 60's, generalmente emplazados en intersecciones de avenidas importantes y que otorgarían a paños de ciudad en la periferia cierta independencia del centro de la ciudad por medio de equipamiento. Sin embargo ante un cambio en el modelo de gestión económica del país desde un planeamiento central a un libre mercado, dichos nodos son ocupados hoy por malls y tiendas de retail, que si bien ofrecen servicios su vocación principal no es la de servir a la ciudad que le rodea, sino que suelen ser herméticos y

distanciados del resto del tejido urbano por plazas de estacionamiento.

Se propone una alternativa a dicho paradigma bajo un modelo de gestión de núcleo urbano que si bien concentra comercio, oficinas y son de financiamiento privado, integra programas que aportan al desarrollo del sector en el que se emplazan, que en el caso específico de Maipú corresponde a programa cultural.



**Núcleo PITS Bellavista y
Núcleo Ochagavía**
Sabbagh Arquitectos,
Núcleos Chile



**Plan regulador de
Santiago,**
1961

Trazado de centros cívicos
en subcentros de la periferia,
en la intersección de
avenidas relevantes.

Conclusión

En la búsqueda de reducir el consumo de recursos y la generación de residuos en construcción, la optimización topológica se presenta como una herramienta de exploración geométrica que desde el diseño y la forma plantea alternativas a la manera actual de construir.

Atrapada en cada bloque de hormigón se haya la geometría teórica óptima, que herramientas digitales como la O.T permite visualizar, excavando de su volumen total la masa innecesaria de hormigón que acumulativamente aporta al total de residuos del país.

A la vez que el hormigón representa una de las mayores problemáticas ambientales, su plástica como cualidad inherente abre la puerta a la depuración geométrica, en que incluso mejoras discretas pueden representar un impacto considerable ante la extensión que tiene el material en el parque construido bajo tipologías específicas.

Sin embargo para que las exploraciones de optimización topológicas sean pertinentes al caso nacional deben reconocer la codependencia existente con otros criterios como la manufactura y tipologías locales.

De los 3 problemas presentados en la introducción de la investigación, se concluye lo siguiente:

1- Respecto a la optimización de componentes:

En la investigación se exploraron diferentes geometrías por medio de optimización topológica, presentando su metodología e iteraciones, dichas exploraciones se insertaron en un formato de viga MBB que permitió su comparación con exploraciones similares hechas por investigadores de otras disciplinas. A partir de exploraciones propias y de autores se elaboraron prototipos digitales y físicos para ser puestos a prueba.

Los prototipos digitales permitieron simular el comportamiento de los elementos por medio de análisis de elemento finito y observar como rasgos geométricos determinados impactan en su desempeño estructural, así como evidenciar las diversas estrategias formales que resuelven las transiciones entre tracción y compresión dentro del componente. De las geometrías teóricas evaluadas, los esquemas de mayor eficiencia en su relación eficiencia/masa fueron las vigas 2 y 7, por su esquema general que sigue los momentos flectores, seguidas de las exploraciones propias en las vigas 3 y 5 de más fácil factura por su sección inferior recta, seguido del resto de autores y finalmente las geometrías monolíticas existentes.

Por otro lado la elaboración de prototipos físicos-análogos fue prueba de la manufacturabilidad de este tipo de geometrías teóricas mediante métodos que simulan principios de producción instalados en Chile, que exigieron a dichas geometrías adaptaciones específicas que permiten su manufactura por medio de moldes hacia una fabricación seriada.

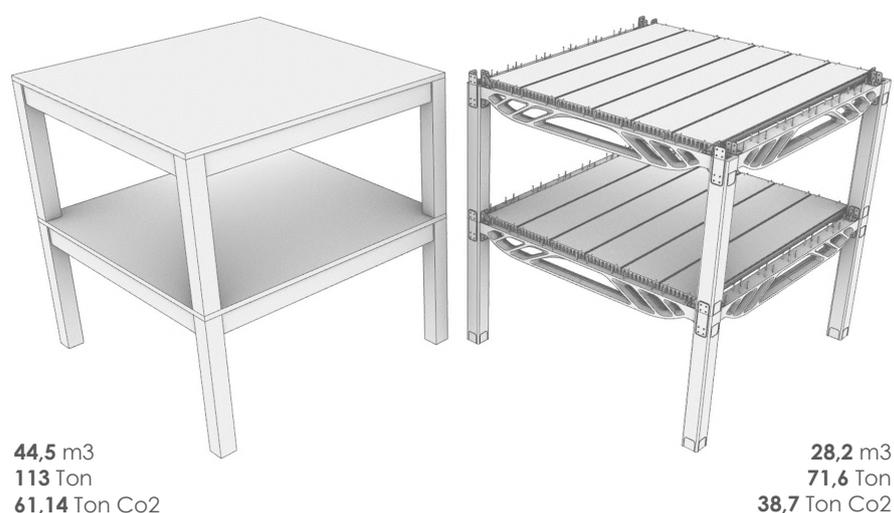
Para cada prototipo se utilizó una estrategia diferente de adaptación a moldeo, como trabéculas curvas, draft de caras inclinadas y tabiques interiores, de estas la más exitosa correspondió a la utilizada en la viga número 1 basada en una transición geométrica (loft) desde nervaduras de espesor mínimo dibujadas en los bordes hacia

las perforaciones interiores.

Otras observaciones que se extraerán de los prototipos físicos será la de su prueba de carga empírica en el laboratorio de estructuras (Dictuc) del departamento de ingeniería estructural y geotecnia*.

Una observación insospechada de la etapa de prototipos físicos fue la calidad escultórica y material del componente, que si bien no fue objetivo de investigación, carga con una clara dimensión formal.

Finalmente por medio de la optimización estructural de componentes, la matriz estructural propuesta en la etapa proyectual alcanza un total de **1337 m³** de hormigón (917m³ Vigas + 420m³ pilares), versus **2612 m³** de hormigón de haber utilizado marcos rígidos convencionales bajo la misma tipología 8x8 (2021m³ Vigas + 591m³ Pilares) representando una diferencia de **1275 m³** de hormigón o un **48% menos masa, traducibles a 3060 toneladas de H.A o 1655 Ton de Co2.**



2- Respecto a la optimización desde la arquitectura y layout estructural:

En primera instancia, desde las discusiones de Gerald Staib, de los 3 tipos de tipologías: Basada en módulos espaciales, basada en muros y basada en pilares. La basada en pilares es la que menos masa usa para resolver una estructura además de ser la más flexible, sin embargo esta se puede caracterizar aún más en el caso nacional. Se identificó en la investigación la tipología 8x8 que implícitamente presenta una coordinación dimensional que permite tipificar componentes, presentando la posibilidad de pasar del paradigma de prefabricación actual relacionado a piezas que se deben diseñar y desarrollar para cada caso específico, modificando las líneas de producción, a la producción masiva de componentes.

La caracterización de la tipología es complementada por la normativa chilena NCH 1537, que también tipifica sus cargas. Por ello la tipología 8x8 no es solo la resolución de un layout flexible sino que en su tipificación y coordinación dimensional descansa la posibilidad de optimizar componentes y producción seriada.

La exploración formal por medio de O.T se hizo en el marco de la tipología 8x8 que permite escalar y multiplicar la geometría resultante a la vez que delimita el problema a resolver con datos específicos: Dimensiones globales de vigas de 7,5m de largo, apoyos simples y cargas homogéneas de 3.2 Toneladas.

El proyecto concilia bajo una misma solución estructural diversos programas que a día de hoy ya existen en el parque construido bajo la tipología 8x8, haciendo muestra de la flexibilidad programática del sistema en las variaciones programáticas de cada nivel, que en su conjunto conforman el núcleo de equipamiento urbano.

3- Respecto a la reutilización de componentes

Dada la especialización necesaria en el diseño de uniones sismoresistentes para sistemas de marcos rígidos, se utilizó como prótesis en este apartado las propuestas de R.P Dhakal y P.K Aninthaneni consistente en uniones apernadas de acero, estudios que constan de una instancia conceptual de diseño seguido de una etapa de experimentación que acredita su comportamiento estructural ante cargas dinámicas.

En el proyecto, el diseño de unión impermanente permite un rápido montaje a la vez de permitir cambios en etapas intermedias del edificio, pudiendo ampliarse ante cambios en la constructibilidad y normativa de su emplazamiento, contrario a la práctica de demoler lo existente una vez queda obsoleto frente a tensiones inmobiliarias y constructibilidad.

Ante una inminente demolición el diseño de unión permite recuperar los componentes y la coordinación dimensional bajo la tipología 8x8 ampliamente utilizada permite su reutilización, contrario a la práctica de transformar la totalidad de la estructura en toneladas de escombros.

Bibliografía

Design, fabrication and testing of a prototype, thin-vaulted, unreinforced concrete floor
A. Liew, D. López López, T. Van Mele, P. Block / ETH Zurich

Applications of topology optimization techniques in seismic design of structure
Kazem Ghabraie

Reinforced Concrete Force Visualization and Design Using Bilinear Truss-Continuum
Topology Optimization
Andrew T. Gaynor, James K. Guest / Journal of structural engineering

3D printing of reinforced concrete elements: Technology and design approach
Domenico Asprone, Ferdinando Auricchio, Costantino Menna

3D Printed Stay in Place Formwork for Topologically Optimized Concrete Slabs
Mathias Bernhard, Mania Aghaei Meibodi, Benjamin Dillenburger / ETH Zurich

3F3D: Form Follows Force with 3D printing: Topology Optimization for Free-form
Building Envelope design with Additive Manufacturing
Bayu Prayudhi T.U Delft / ARUP

Topology optimization for braced frames: Combining continuum and beam/column
elements
Lauren L. Stromberg, Alessandro Beghini, William F. Baker, Glaucio H. Paulino

Environmental assessment of multi-functional building elements constructed with
digital fabrication techniques
Isolda Agustí-Juan, Andrei Jipa, Guillaume Habert

Topology Optimisation Influence on Architectural Design Process
Sebastian Bialkowski /Lodz University of Technology

Seismic-Resistant Precast Concrete Structures: State of the Art
Yahya C. Kurama, Sri Sritharan, Robert B. Fleischman, Jose I. Restrepo, Patricio Bonelli

Conceptual development: Low loss precast concrete frame building system with steel
connections
P.K. Aninthaneni, R.P. Dhakal

Seismic performance of sub-assembly of a demountable precast concrete
frame building
P.K. Aninthaneni & R.P. Dhakal

A Demountable Connection for Low-Rise Precast Concrete Structures with DfD for
Construction Sustainability-A Preliminary Test under Cyclic Loads
Gaochuang Cai, Feng Xiong, Yong Xu, Amir Si Larbi, Yang Lu, Mikio Yoshizawa

Uniones viga-columna continuas de hormigón armado prefabricado: apuntes sobre su
comportamiento.
Janet Otmara Martínez Cid, Julia Rosa Álvarez López, Nelson Fundora Sautié

Seismic-Resistant Precast Concrete Structures: State of the Art

Yahya C. Kurama, Sri Sritharan, Robert B. Fleischman, Jose I. Restrepo, Patricio Bonelli

Catálogo de productos, Jacenas

Primer reporte del manejo de residuos sólidos en Chile

María Ignacia Benítez Pereira / Gobierno de Chile 2010

Informe Final: Consultoría Estudio “Caracterización de residuos de la construcción, 1°etapa: Desarrollo, validación y calibración de metodología, aplicado a casos piloto”

Grupo de trabajo CITEC U. Bío Bío 2017

Memoria de Título: Planta de tratamiento integral de residuos de la construcción y demolición Puente Alto

Maeva Contreras, Profesor Guía: Eduardo Lyon / FAU U de. Chile

Materials for sustainable sites

Megan Calkins

Platforms: Bridging the gap between construction + manufacturing

Jaimie Johnston, Bryden Wood

Método SAR de diseño.

Carlo Alarcón, Gonzalo Herreros, Tomás Morales, Linda Schilling. Cristóbal Torres. / U. Técnica Federico Santa María

Diseño de Soportes

N. John Habraken

Hoja de ruta Chile, Industria del Cemento: Hacia una economía baja en carbono

ICH

Experimental Study of Composite Hollow RC Column under Uniaxial Compressive Load

Deokhee Won

Components and systems

Gerald Steib

Seismic design of R/C piers of hollow circular cross sections

Dimosthenis Kifokeris

Diseño Sísmico Estructural con Columna Hueca de Sección Estructural de Tamaño Jumbo Formadas al Frio

NSMP, Santiago 2013

Simultaneous shape and topology optimization of prestressed concrete beams

Oded Amir / Emad Shakour

Form Follows Force: A theoretical framework for Structural Morphology, and Form Finding research on shell structures

Qingpeng Li

Less Material More Design: Optimized concrete structures with fabric formwork

Geometric constraints for shape and topology optimization in architectural design
Charles Dapogny, Alexis Faure

Recyclable Architecture: Prefabricated and Recyclable Typologies
Marielle Ferreira Silva

Técnica y arquitectura en la ciudad contemporánea, 1950-2000
Iñaki Ábalos / Juan Herreros

Cambios en la estructura funcional del espacio intraurbano del gran Santiago: 1990_2010
Javiera Belén Yañez Sanchez

Norma NCH 1537 of 2009 (Diseño estructural: Cargas permanentes y cargas de uso)
INN

Norma NCH170 of 2016 (Hormigon Requisitos generales)
INN

Anexos

16 Láminas tamaño A1 de Proyecto de Título "Núcleo de Equipamiento Santiago Poniente"

Resistencia desde la Geometría

La construcción representa un **34%** de la generación de residuos del país, de la que aproximadamente un **80%** corresponde a hormigón.

El sistema estructural propuesto reúne una serie de estrategias de diseño para la reducción, que se inserta por medio de coordinación dimensional en una tipología recurrente y ampliamente utilizada, denominada "8x8"

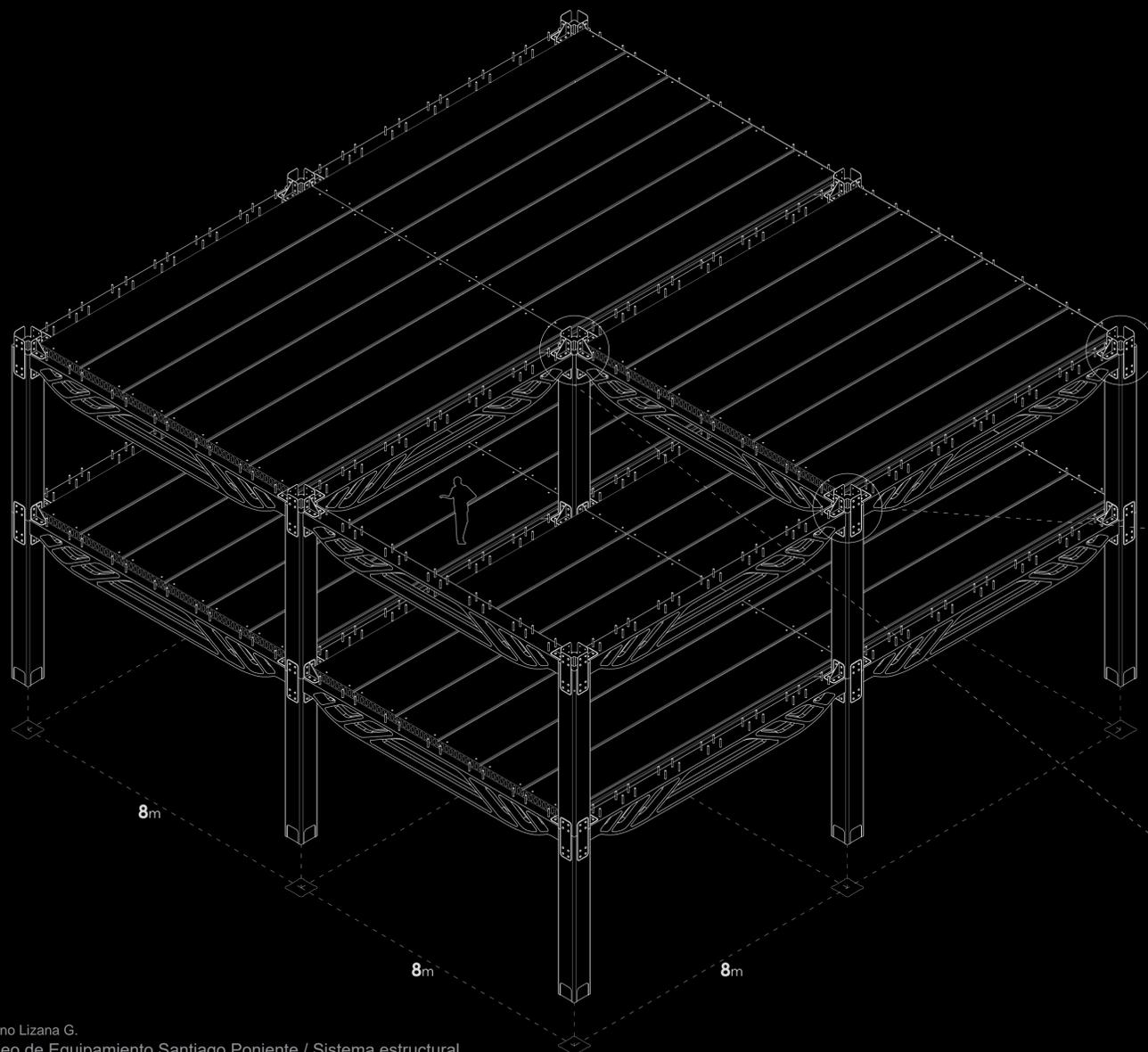
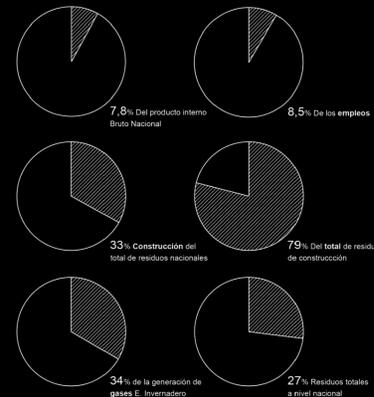
El sistema propone la implementación de **optimización topológica** en sus componentes como método de reducción de masa contenida en estructuras. Para ello reúne exploraciones propias y de autores especializados en la misma problemática. Dichas exploraciones fueron simuladas en entornos digitales para discriminar entre las más eficientes. En última instancia proyectual, la estructura hizo uso de un **48%** menos hormigón que una estructura de marcos monolíticos convencionales, lo que equivale a 3060 Ton de H.A y 1655 Ton de Co2.

Adicionalmente incorpora el diseño de uniones impermanentes apernadas, que mediante investigaciones de laboratorio demostraron propiedades mecánicas equivalentes a uniones monolíticas convencionales, permitiendo a su vez modificaciones en etapas intermedias del ciclo de vida del edificio y recuperar sus componentes una vez llega a su fin.

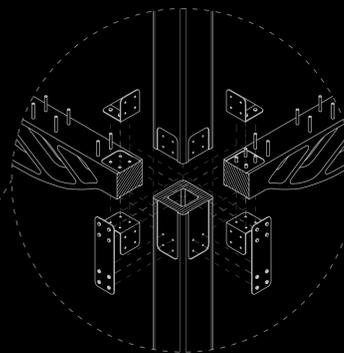
Su lógica replicable va desde un número acotado de tipos de partes manufacturables que desde el diseño de la unidad estructural conforman una matriz capaz de responder a diversas escalas y cambios programáticos.



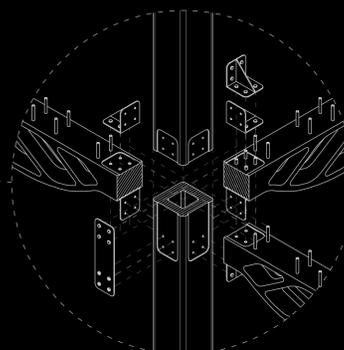
Reducción de masa



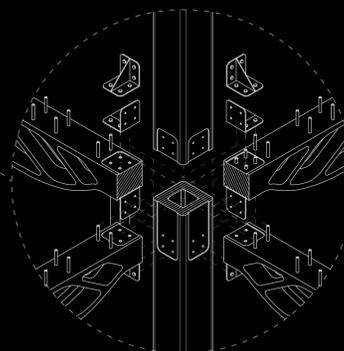
Detalle de unión esquina
2 Vigas



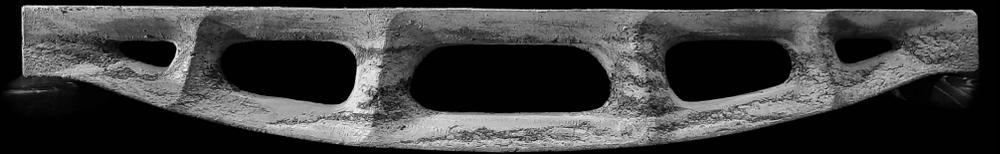
Detalle de unión Perímetro
3 Vigas



Detalle de unión Interior
4 Vigas



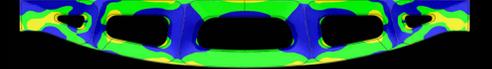
Viga 1 Esquema basado en investigaciones de E.Shakour y O.Amir / Moldaje por fricción geométrica de cavidades y nervaduras exteriores



Compresión / Tracción



Factor de Seguridad / Estrés



Viga 2 Esquema basado en investigaciones de Shakour y Amid / Moldaje por superficies curvas en trabéculas



Compresión / Tracción



Factor de Seguridad / Estrés



Viga 3 Esquema basado en exploraciones propias de Fusion 360 / Moldaje por superficies curvas en trabéculas



Compresión / Tracción



Factor de Seguridad / Estrés



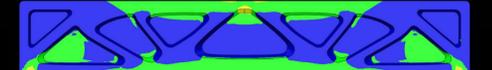
Viga 5 Esquema basado en investigaciones de Anders Clausen / Moldaje por biselado de caras interiores y tabique interior en alma central



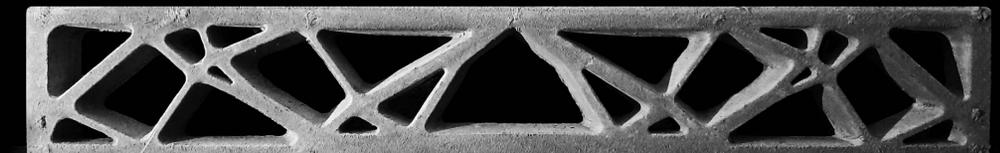
Compresión / Tracción



Factor de Seguridad / Estrés



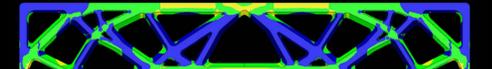
Viga 4 Esquema basado en investigaciones de P. Dombrowsky & A. Søndergaard / Moldaje por biselado de caras interiores



Compresión / Tracción

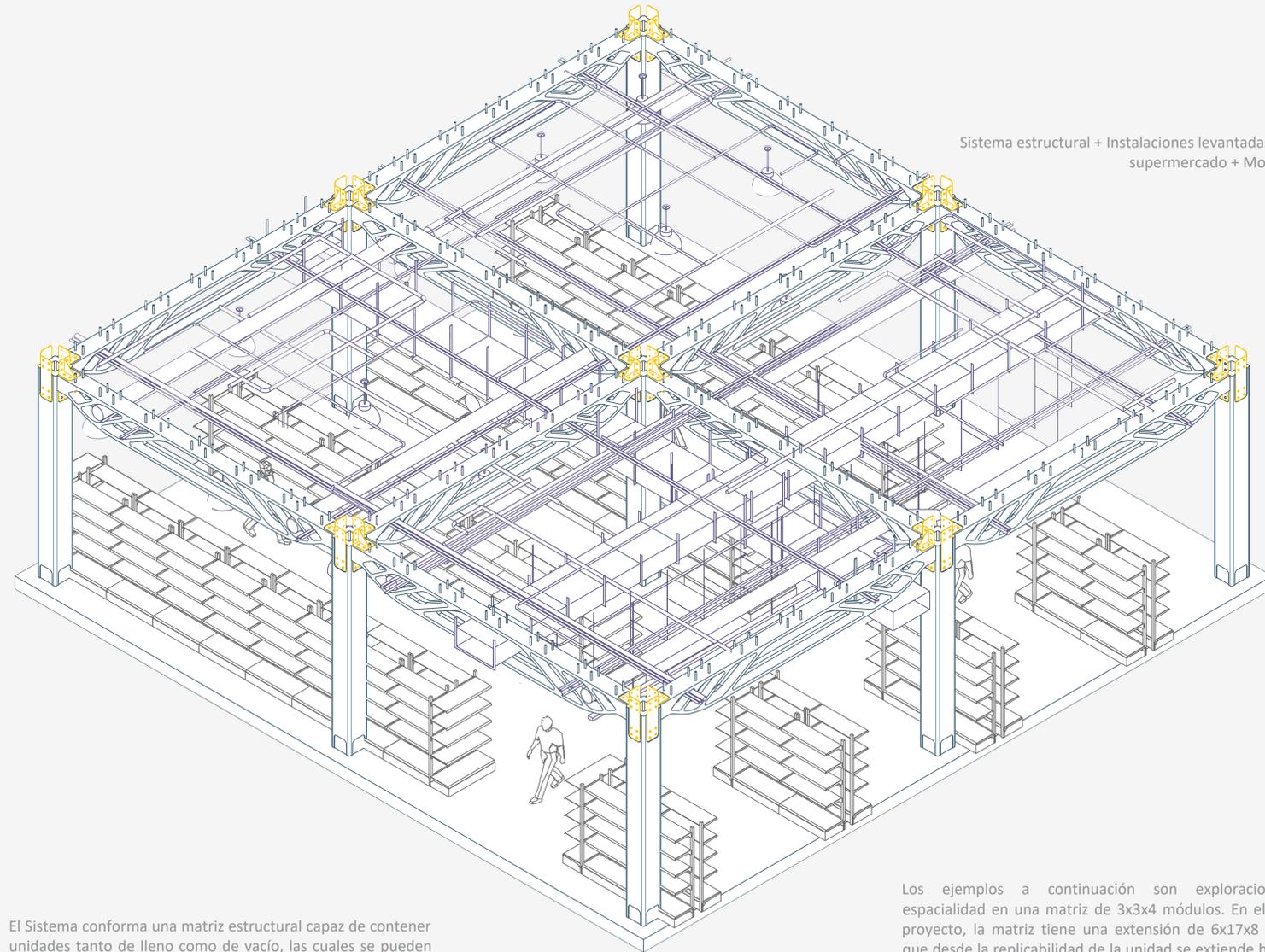


Factor de Seguridad / Estrés



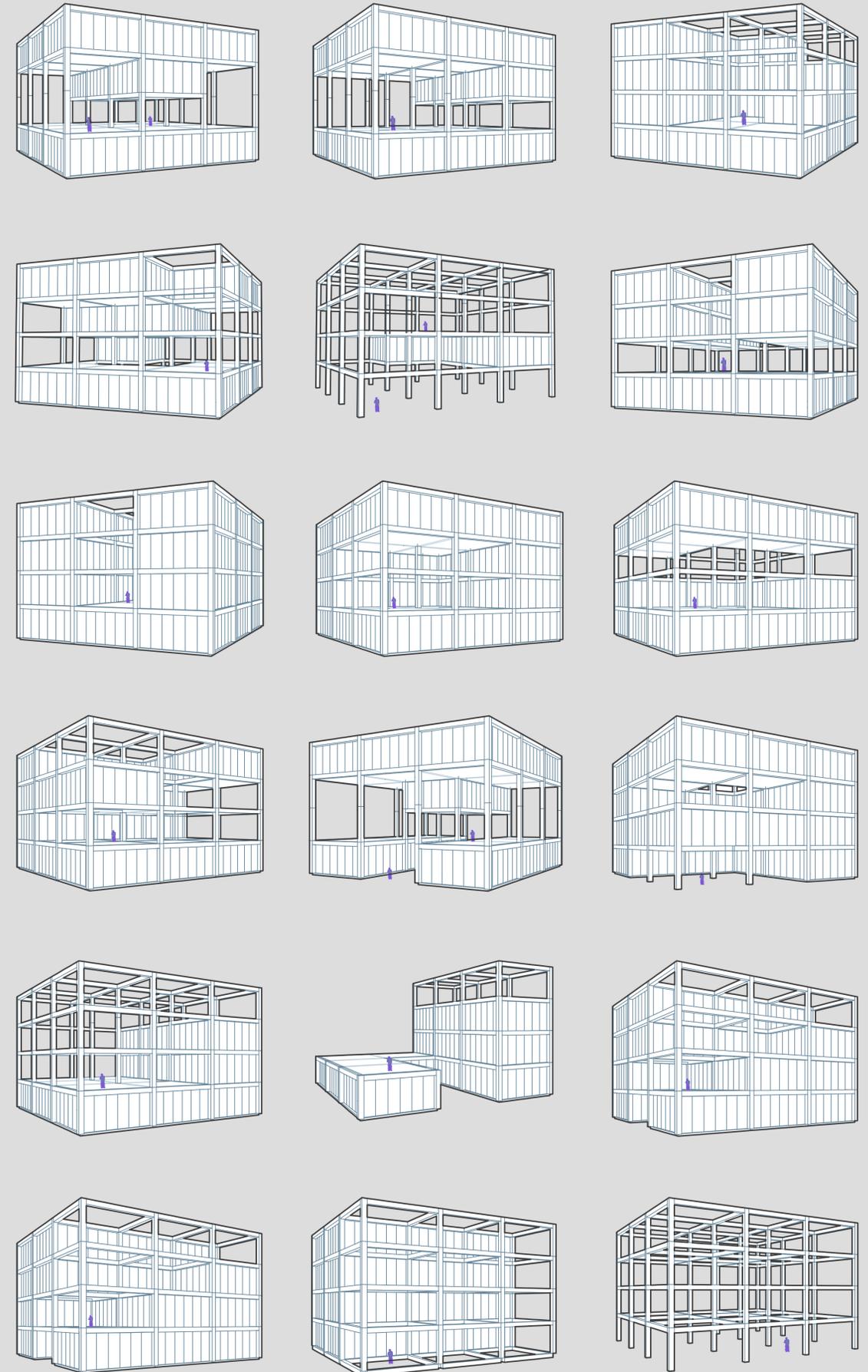
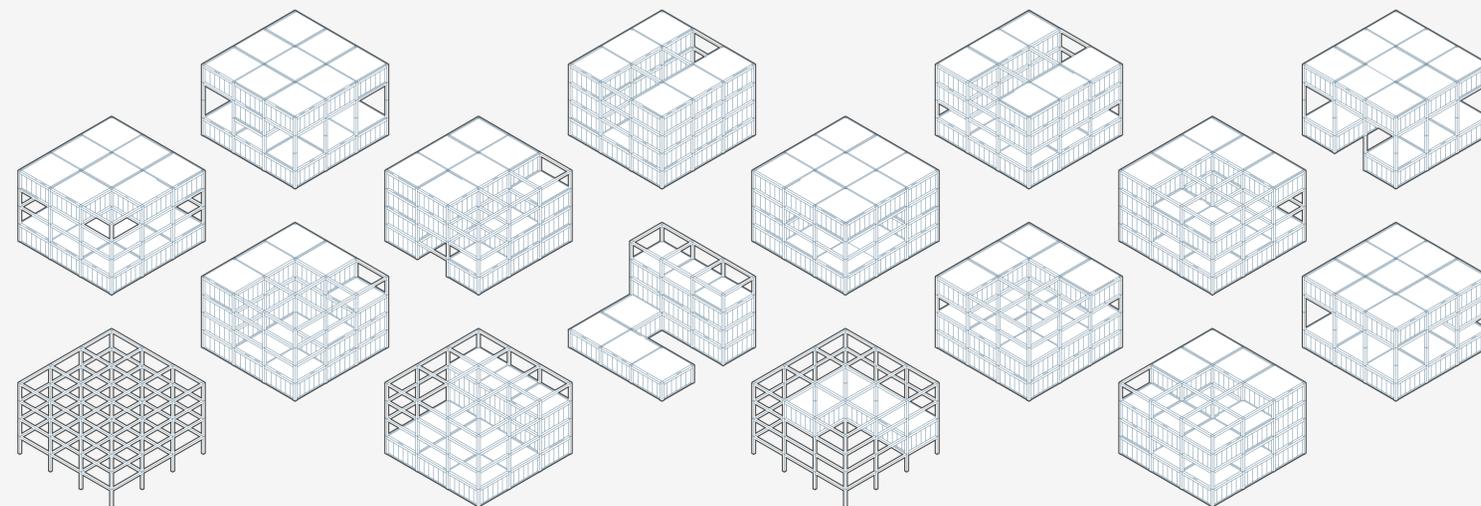
Matriz estructural y espacialidad

Permutaciones de lleno y vacío + permeabilidad de instalaciones



El Sistema conforma una matriz estructural capaz de contener unidades tanto de lleno como de vacío, las cuales se pueden permutar para configurar diversas espacialidades.

Los ejemplos a continuación son exploraciones de espacialidad en una matriz de 3x3x4 módulos. En el caso de proyecto, la matriz tiene una extensión de 6x17x8 módulos que desde la replicabilidad de la unidad se extiende hasta una escala de pieza urbana y metropolitana.



Circuito de Subcentros de Santiago

Equipamiento Urbano hacia una ciudad Polinucleada PRM92 - RM1960

El plan regulador metropolitano RM-PRM 92 vigente propone una serie de 11 zonas de "interés metropolitano" que corresponde a zonas con prioridad para el desarrollo de equipamiento, mediante incentivos normativos presentes en los planes reguladores comunales.

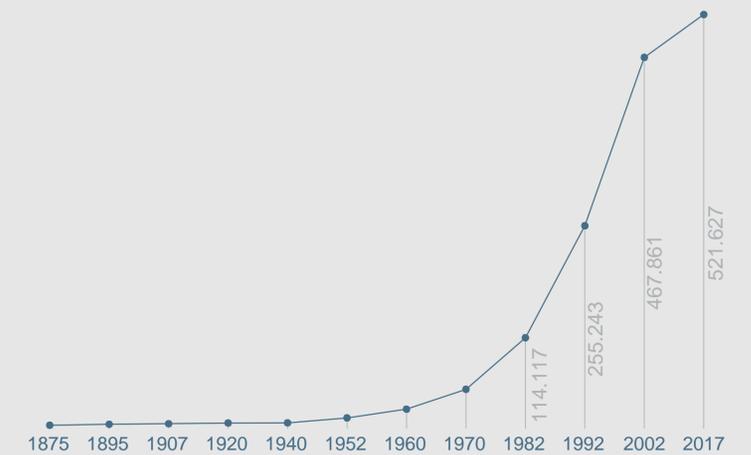
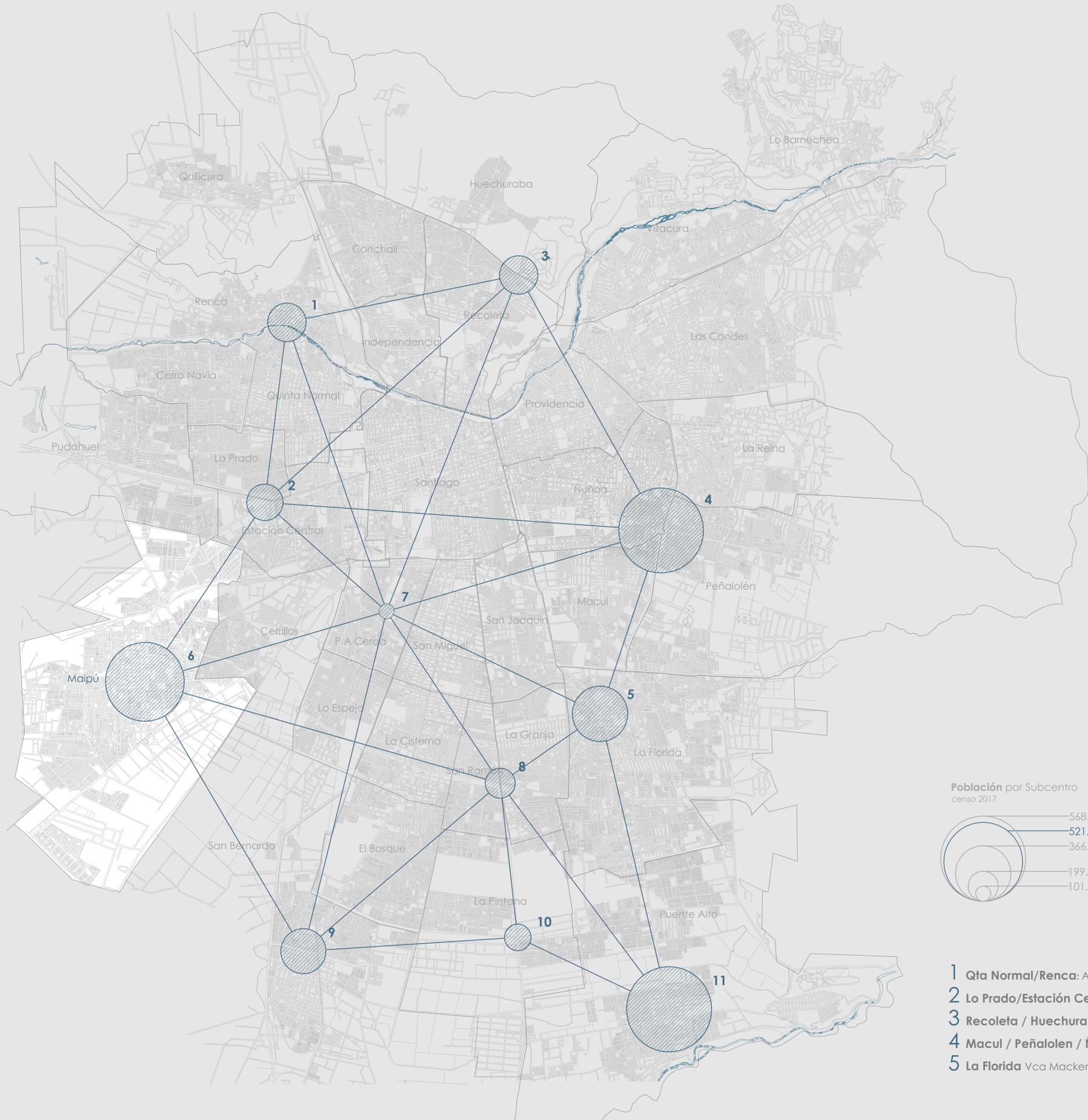
Responde a la búsqueda de generar subcentros hacia una ciudad polinucleada, en que grandes paños de ciudad y sus habitantes ganen independencia del centro de Santiago y su cono Nor-Oriente.

El circuito de 11 subcentros retoma voluntades y trazados que desde la década de los 60's se emplazan en las intersecciones de arterias viales importantes, generalmente en límites comunales. De estos quizá el más consolidado y robusto es el centro de **Maipú (6)** ubicado frente a la plaza de armas de la comuna; En la intersección de Av 5 de Abril, de carácter monumental y Av Pajaritos, de relevancia vial al ser la prolongación de la Alameda hacia Santiago poniente y el acceso a la conurbación de Peñaflor, Padre Hurtado y Talagante.

La relevancia de este subcentro responde a su proceso de formación, que a diferencia del resto se originó como un desarrollo autónomo a Santiago desde inicios del siglo XIX, con su propio centro, servicios y comercio, que ya desarrollado sería integrado al resto de la ciudad mediante su proceso de crecimiento urbano.

Actualmente la comuna está en medio de un proceso de **metropolitanización**. Con un acelerado crecimiento demográfico que la ha transformado en la segunda comuna más poblada del país, lo que ha gatillado el desarrollo y densificación de su centro en los últimos 15 años.

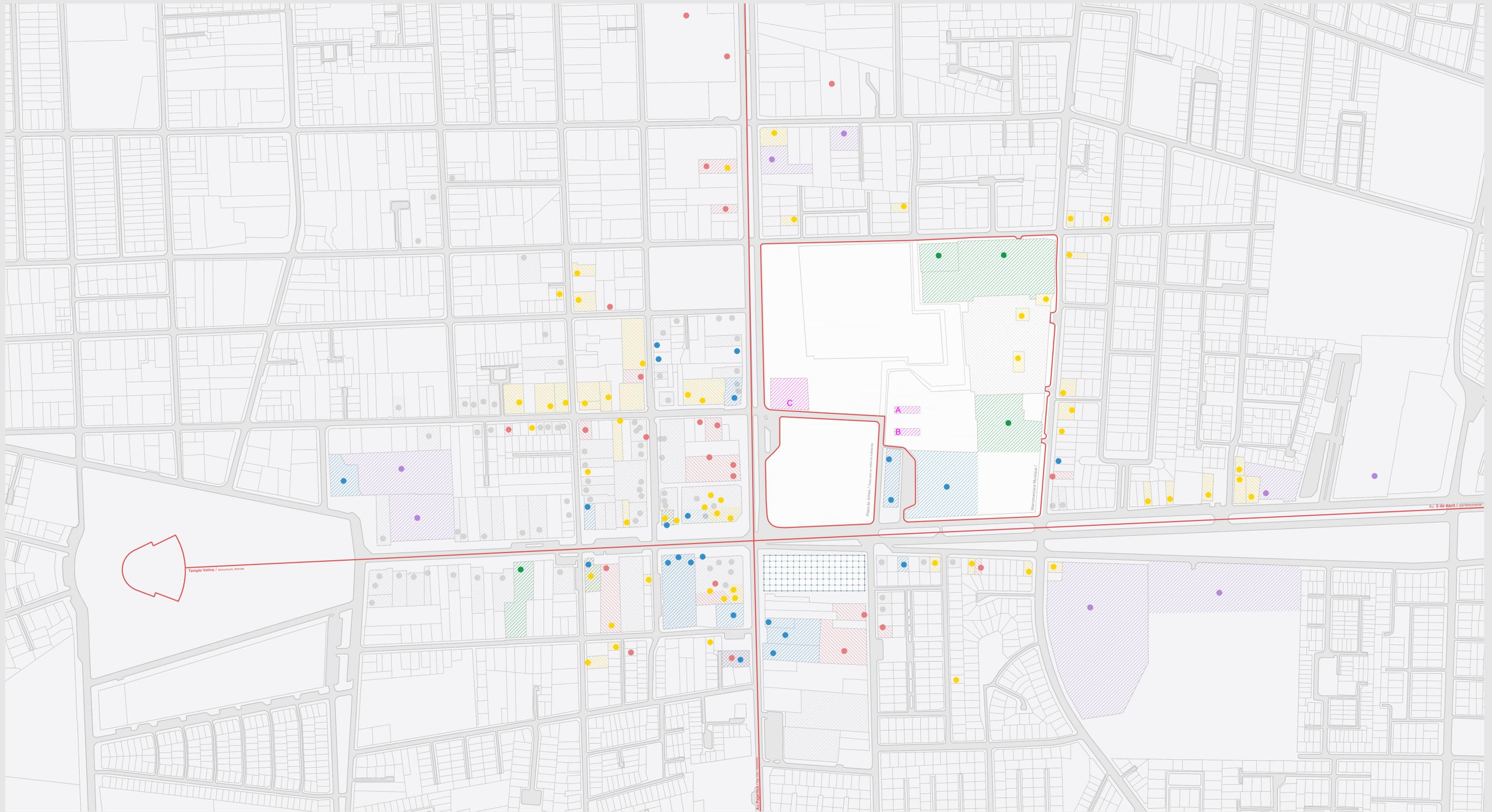
Ante la necesidad de los subcentros por equipamiento urbano y el recurrente uso de la tipología 8x8 en programas de equipamiento, Se plantea como proyecto un núcleo de equipamiento comunal en el centro de Maipú.



Población por Subcentro censo 2017



- 1** Qta Normal/Renca: Av Costanera / Sen. Jaime Guzmán
- 2** Lo Prado/Estación Central Ruta 68/ Alameda (Las Rejas)
- 3** Recoleta / Huechuraba Av el Salto / Vespucio
- 4** Macul / Peñalolen / Ñuñoa Av Grecia / Vespucio
- 5** La Florida Vca Mackena / Walker Martínez/ Vespucio
- 6** Maipú 5 de Abril / Alameda (Pajaritos)
- 7** Pedro Aguirre Cerda Clotario Blest / Av Departamental
- 8** San Ramón / La Granja Av Santa Rosa / Vespucio
- 9** San Bernardo Av Colón / Av Portales
- 10** La Pintana Av Santa Rosa / Av Lo Blanco
- 11** Puente Alto Concha y Toro / Av Eyzaguirre



Biblioteca Municipal actual



Biblioteca Municipal actual



Actualización de plan regulador comunal

- Servicios Banca, AFP, Cajas
- Salud Consultorios, Clínica dental
- Restaurantes Bares, cafés
- Serv. Público Bomberos, comisaría
- Comercio locales, tiendas
- Educación Escuelas, CFT
- Cultural: Teatro, Biblioteca

El centro cívico de Maipú se nutre de una serie de servicios que en su conjunto dotan a la comuna de relativa autonomía para usos que van más allá de su fuerte comercio, como banca, salud, servicios legales, servicios sociales y servicios especializados. Sin embargo para usos culturales, la oferta de la comuna es escasa y exige a sus habitantes trasladarse a otras partes de la ciudad.

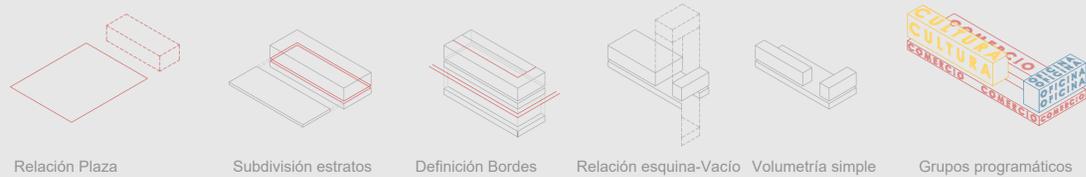
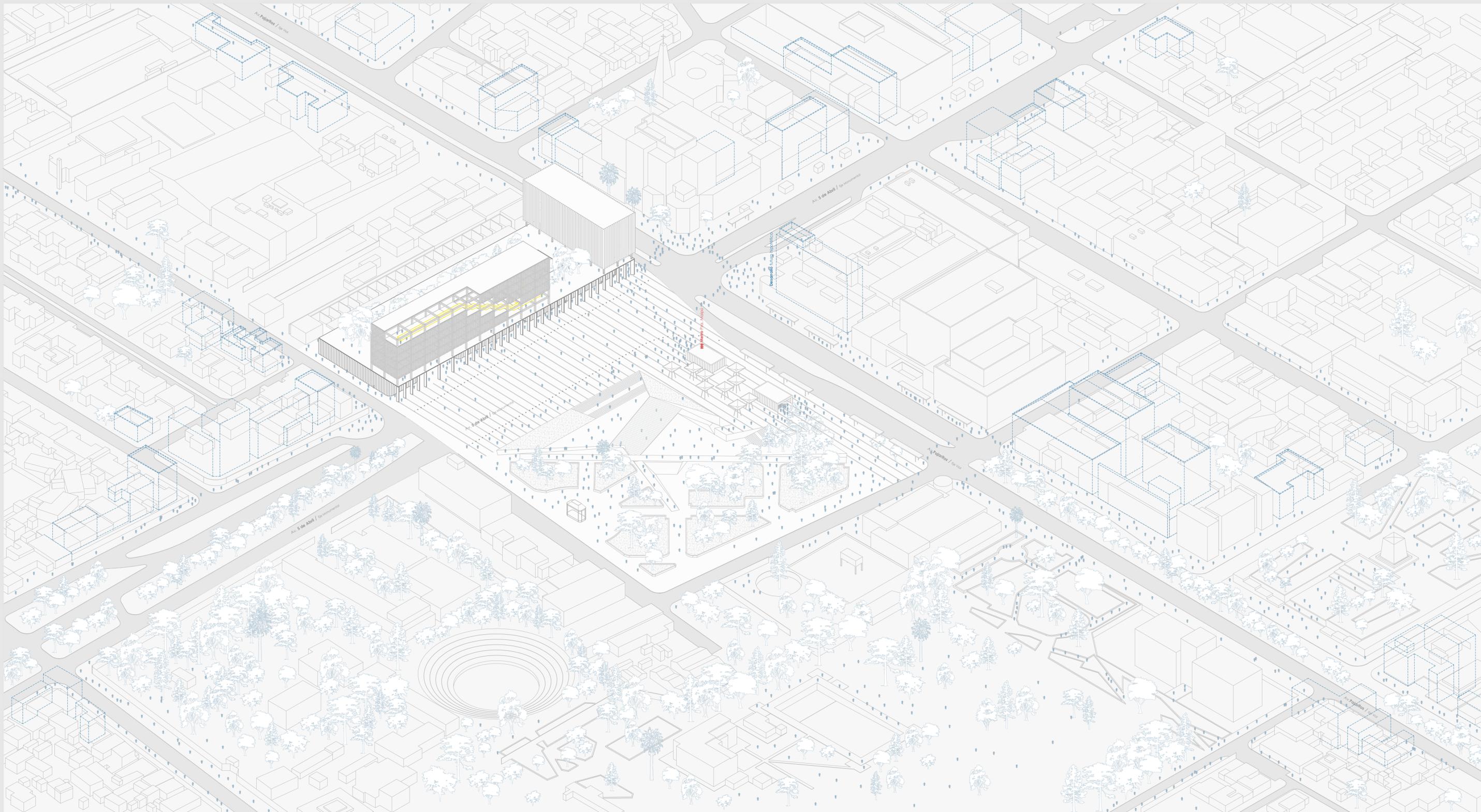
La escala del programa cultural de la comuna (A,B) ha quedado obsoleta respecto a su demanda y el acelerado crecimiento demográfico. Por otro lado, la mayor infraestructura de este tipo en la comuna, su teatro municipal (C), solo se utiliza de forma intermitente.

Así como la plaza de armas de la comuna ha sido actualizada bajo el concepto de "Plaza para un millón de habitantes", se propone frente a ella un núcleo de "equipamiento para un millón de habitantes" que le complemente.

El proyecto se emplaza en un cabezal de cuadra escasamente densificado en la esquina Sur-Oriente de la intersección de dos ejes urbanos relevantes: La Av. 5 de abril como eje monumental que remata en el templo votivo de Maipú, y la Av. Pajaritos como eje vial que es la prolongación de la Alameda a Santiago poniente y acceso a la conurbación de Peñalolén-Padre Hurtado-Talagante.

Enfrenta a la plaza de armas de la comuna y la macromanzana municipal que la contiene en conjunto a áreas verdes el mercado municipal y piscina municipal. Ha entrado recientemente a la zona ZC2 de planeamiento comunal, por lo que conforme a la tendencia observada en cuadras circundantes se prevee un proceso de densificación





Así como la plaza de armas de la comuna ha sido actualizada bajo el lema de "Plaza para un millón de habitantes", se propone frente a ella un volumen de equipamiento complementario cuya escala dialogue con la plaza y las piezas urbanas que ahí confluyen.

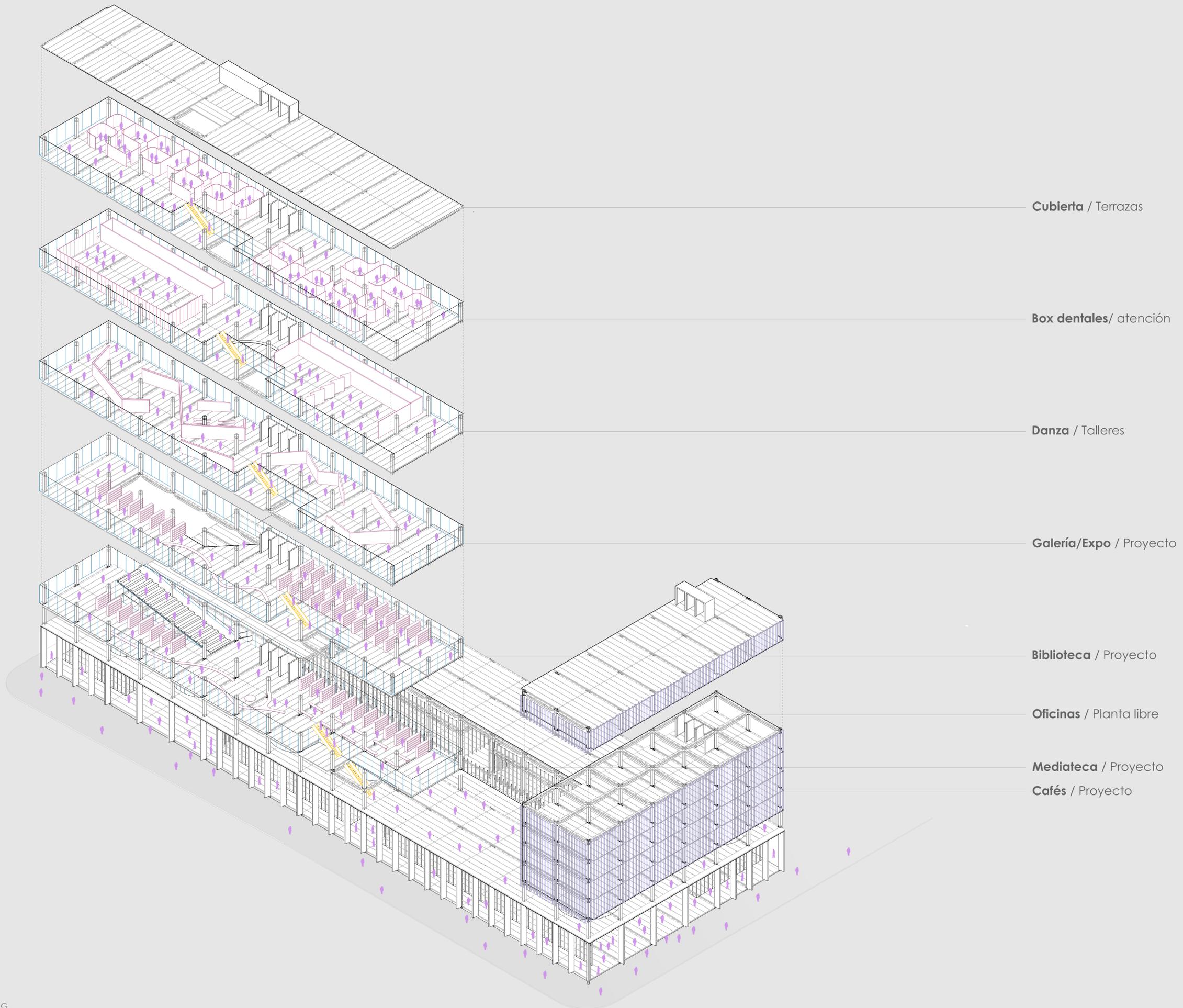
El proyecto se plantea como una matriz estructural de las dimensiones de su emplazamiento, configurando un borde robusto que contiene a la plaza de armas y su macromanzana.

Se divide en dos estratos: Uno inferior y uno superior: El estrato inferior dialoga con la edificación circundante, además de configurar los espacios públicos, salida de metro y galerías comerciales que perpetúan el trazado comercial preexistente y su relación con el pasaje comercial Alberto Hurtado colindante al proyecto en su borde sur. Su relación con la plaza y avenidas principales es permeable, por medio de columnatas.

El estrato superior responde a la densificación en metros cuadrados, asoleamiento y vistas, consistente en dos volúmenes, uno de oficina ubicado en la esquina de mayor valor comercial y otro de programas culturales enfrentando a la plaza en todo su largo y configurando su borde.

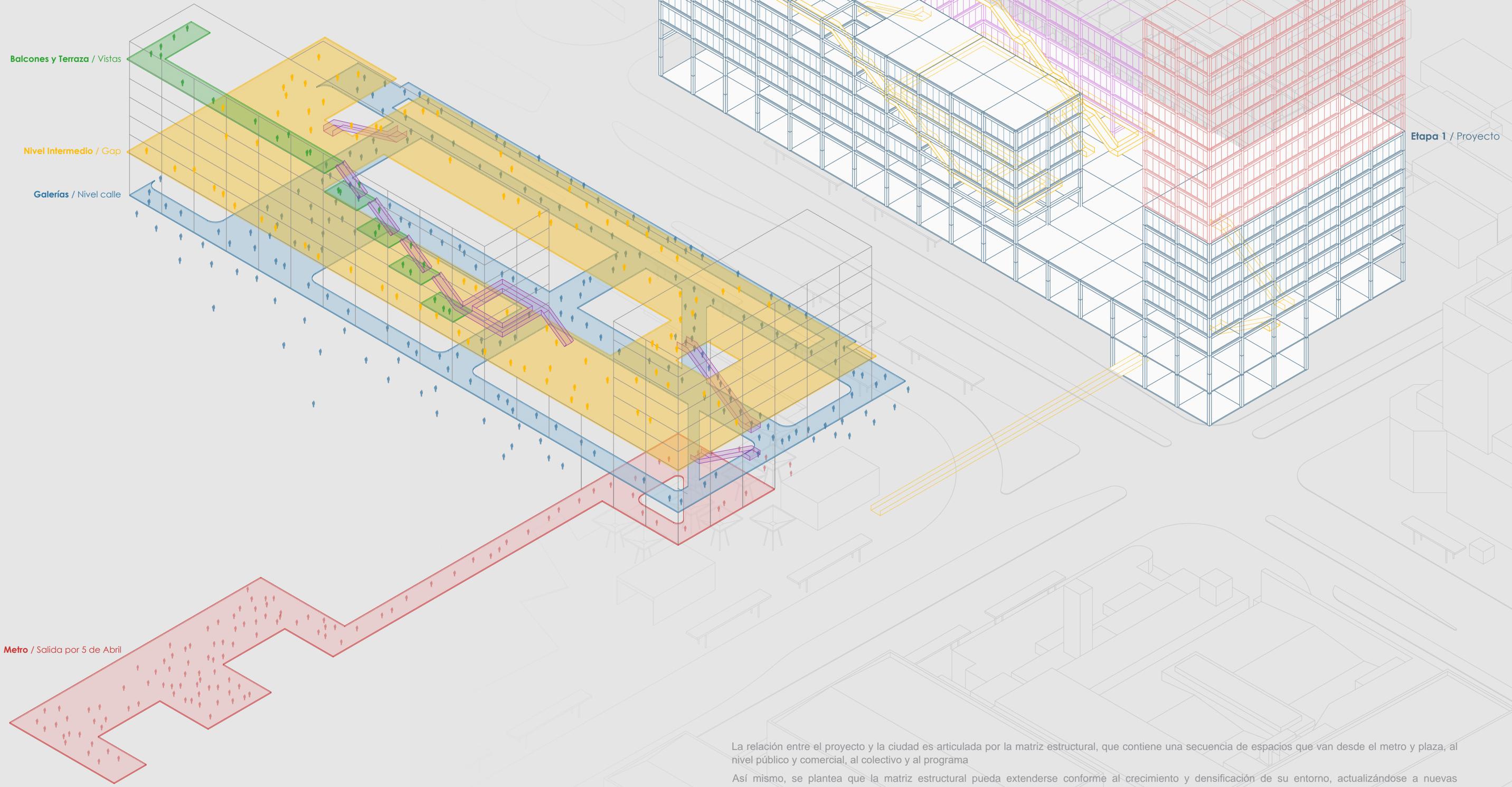
Los volúmenes superiores son independientes y recibidos por un nivel intermedio con programas como café y Co-work

Ambos estratos responden formalmente a la esquina, el estrato inferior llegando a la esquina con un espesor mínimo, abriéndose hacia Av Pajaritos y los volúmenes superiores con un vano a la plaza.



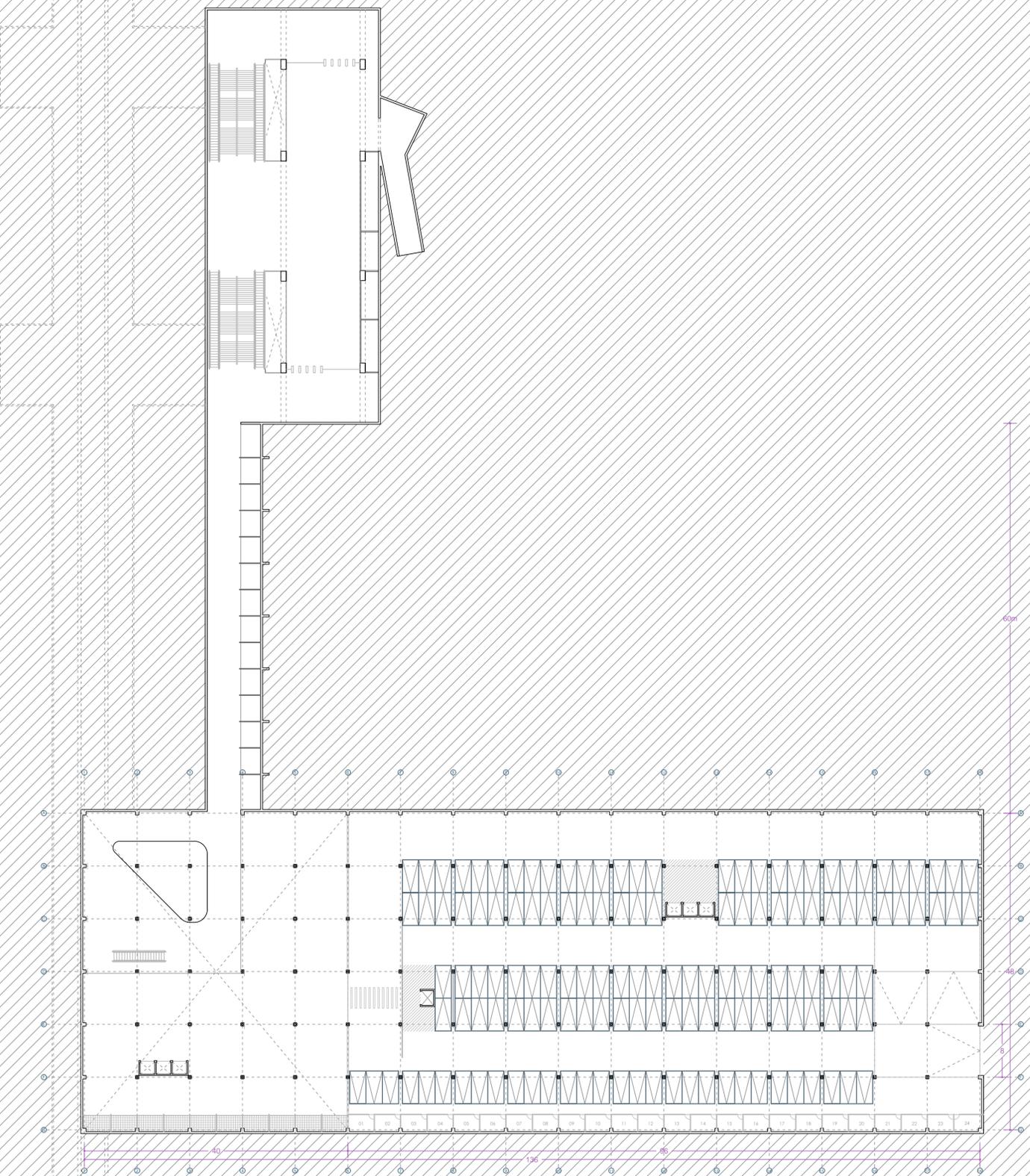
Articulación de Espacio Público / Evolución hipotética

Metropolización del centro del espacio público a los programas.



La relación entre el proyecto y la ciudad es articulada por la matriz estructural, que contiene una secuencia de espacios que van desde el metro y plaza, al nivel público y comercial, al colectivo y al programa

Así mismo, se plantea que la matriz estructural pueda extenderse conforme al crecimiento y densificación de su entorno, actualizándose a nuevas constructibilidades y alturas permitidas.



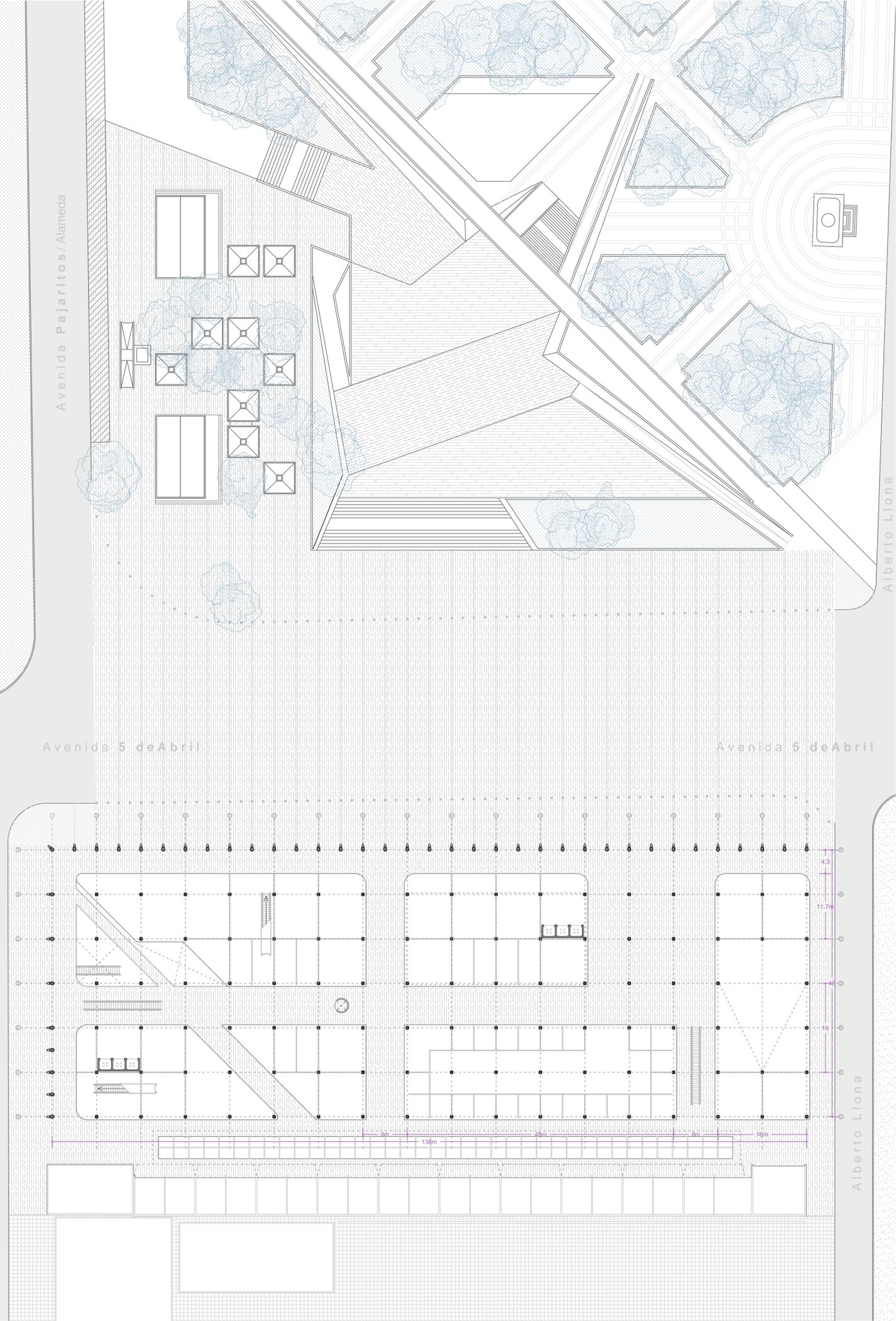
Avenida Pajaritos/Alameda

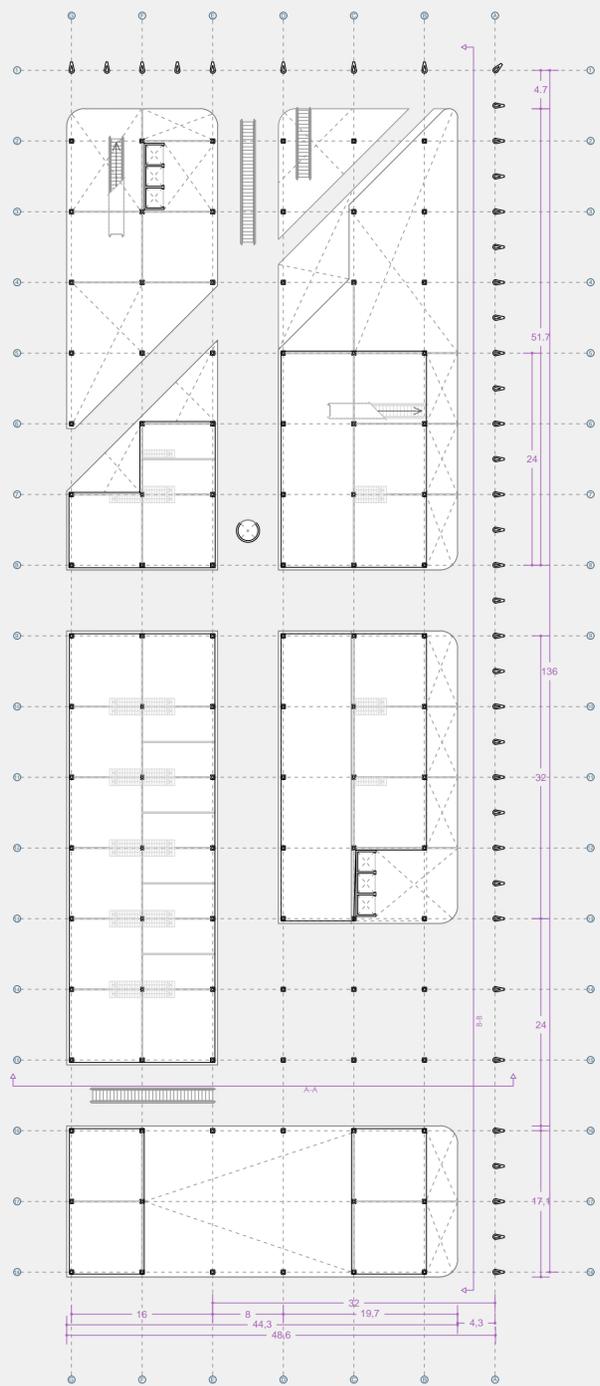
Avenida 5 de Abril

Avenida 5 de Abril

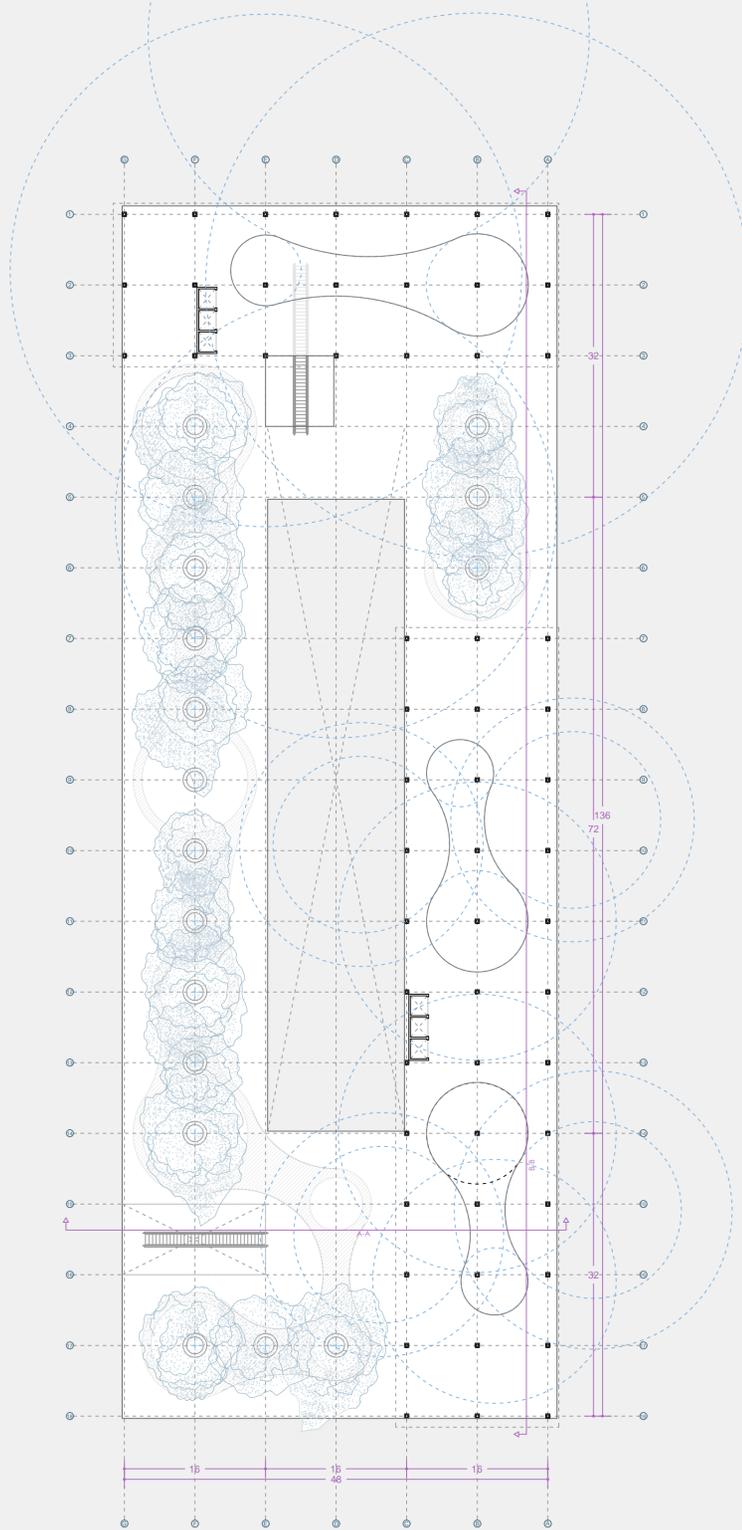
Avenida Pajaritos/Alameda

Alberto Liona

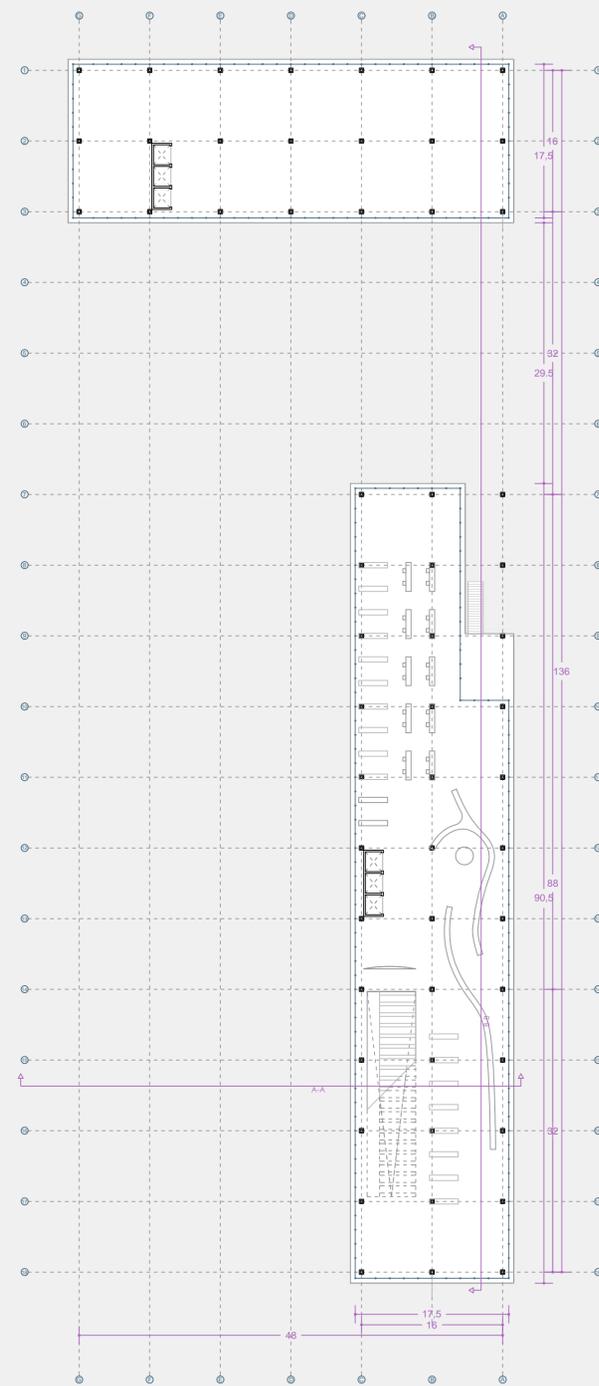




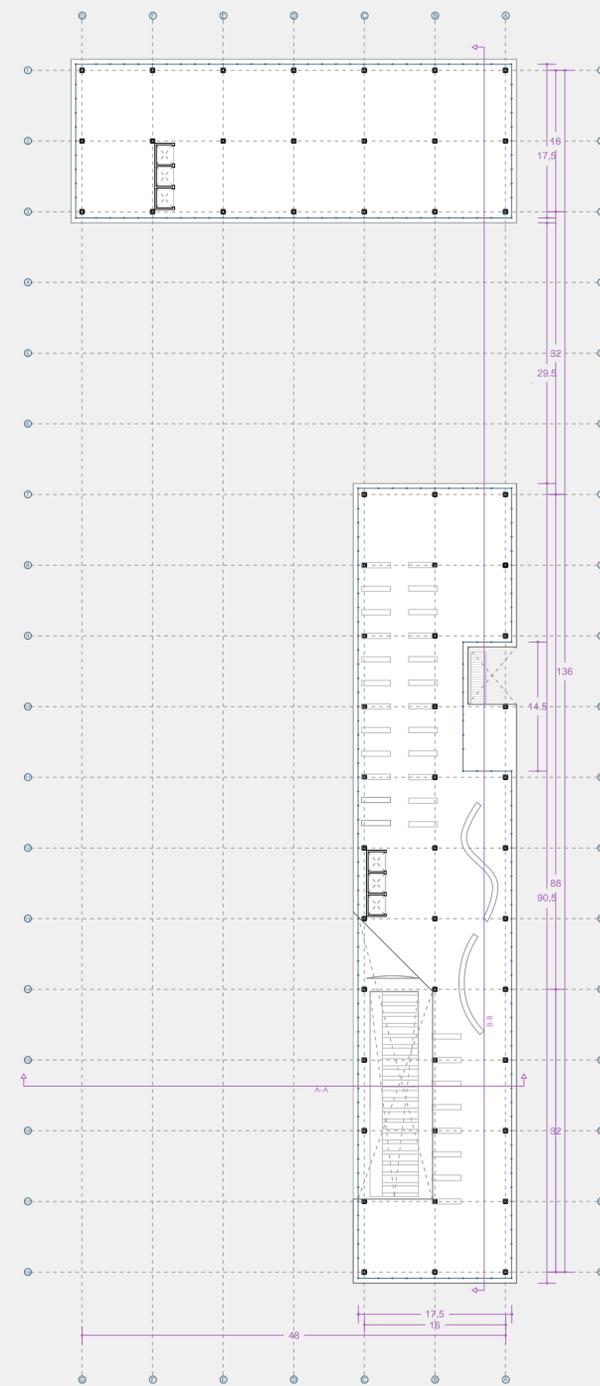
Segundo nivel Comercio



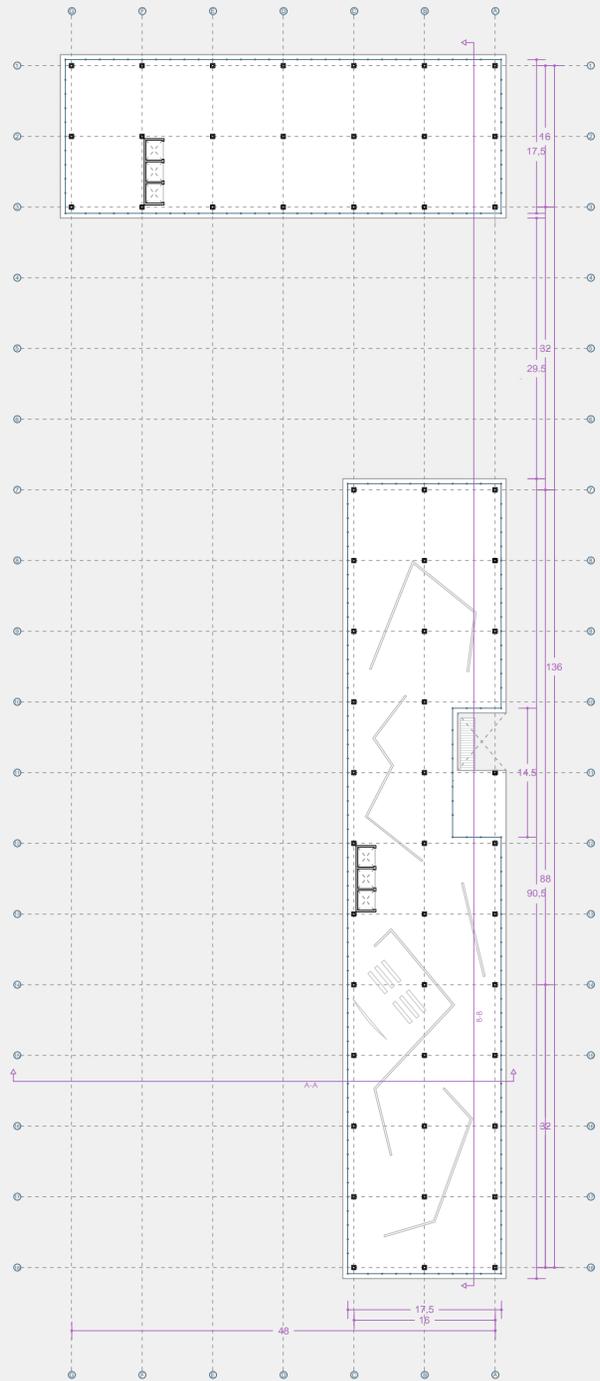
Nivel Intermedio



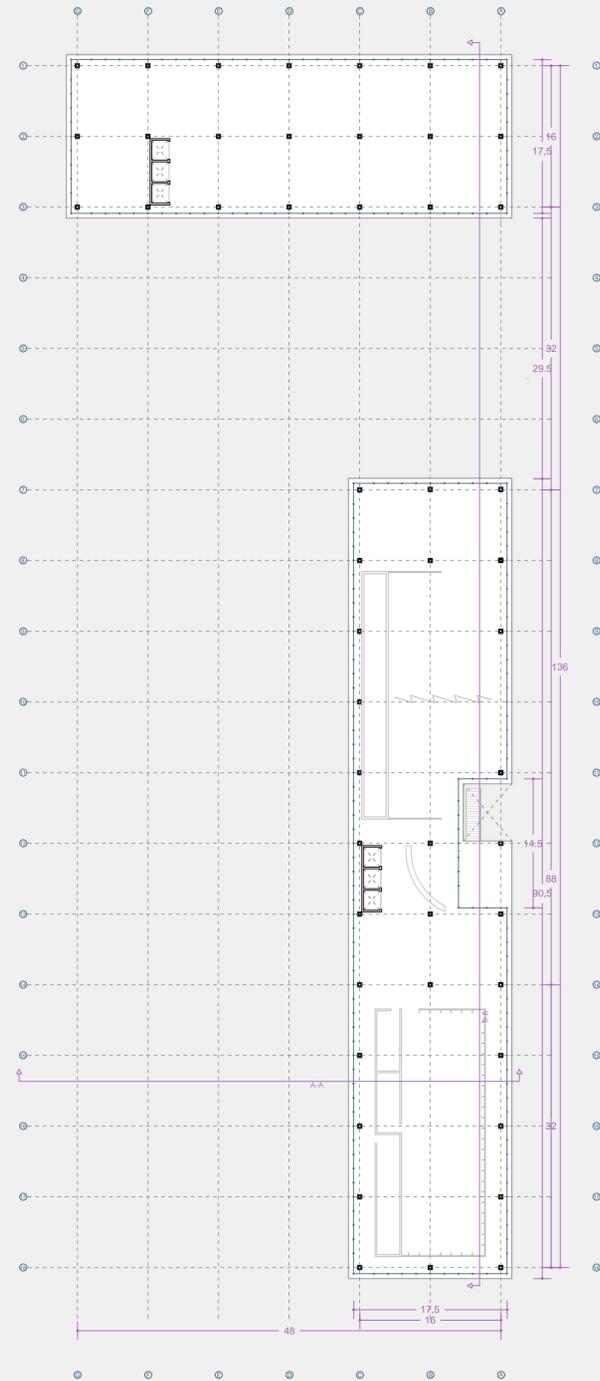
4to nivel - Mediateca



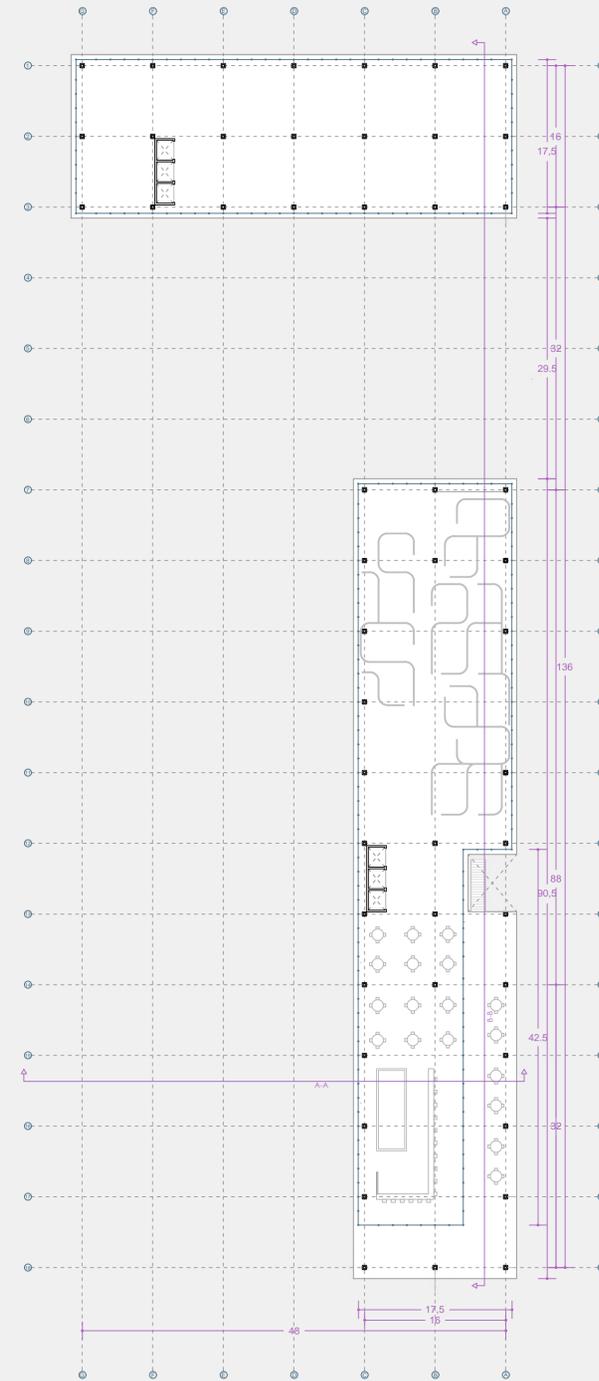
5to nivel - Biblioteca



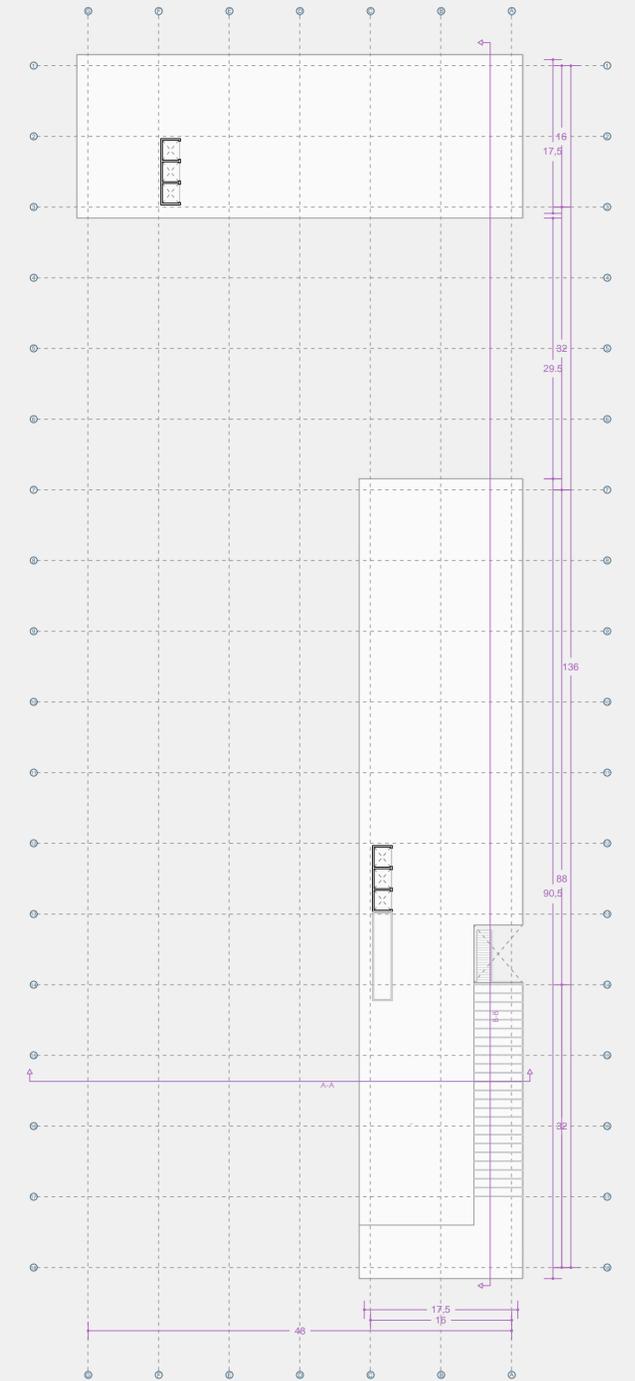
6to nivel Sala de Exposición / Galería



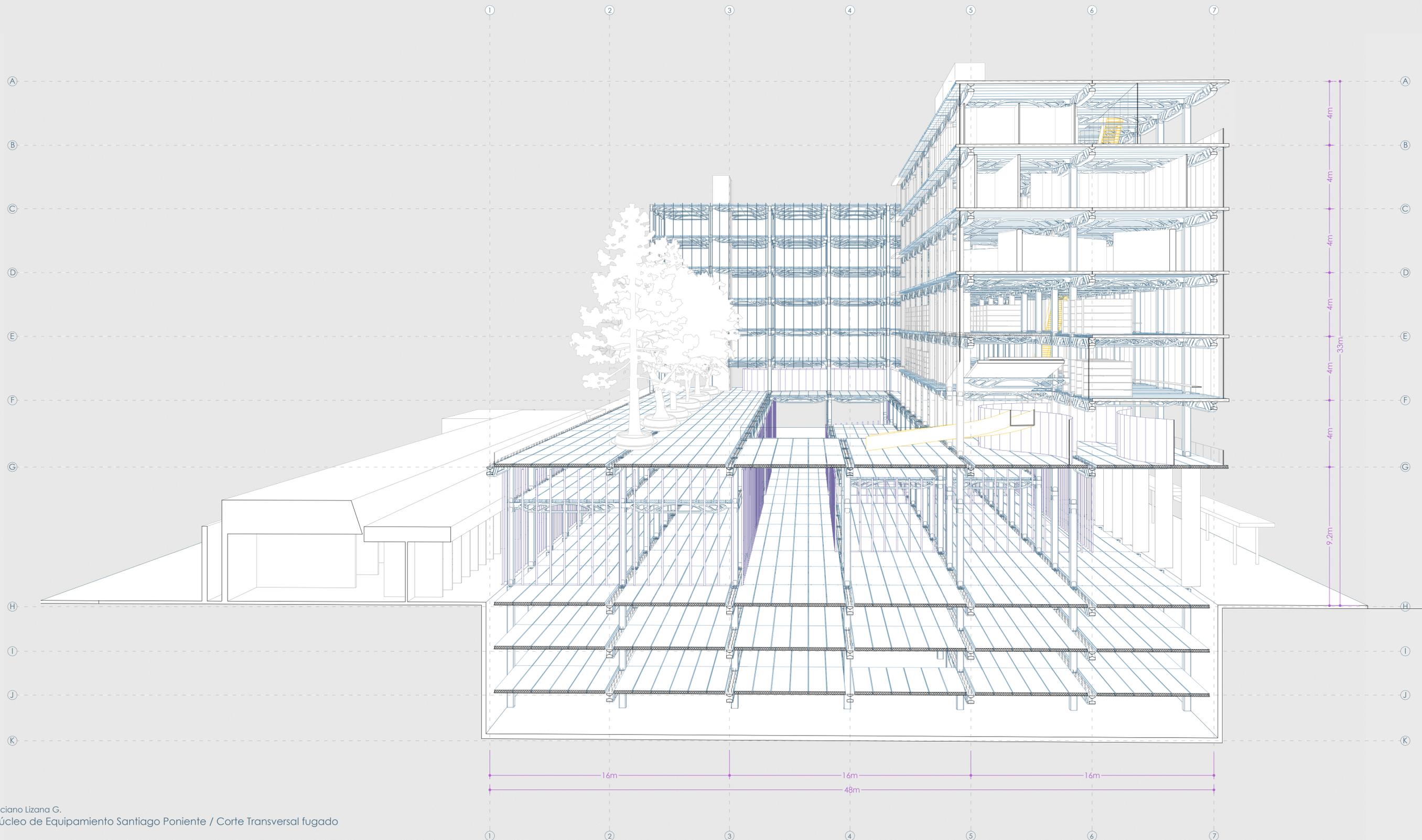
7mo nivel danza / Talleres



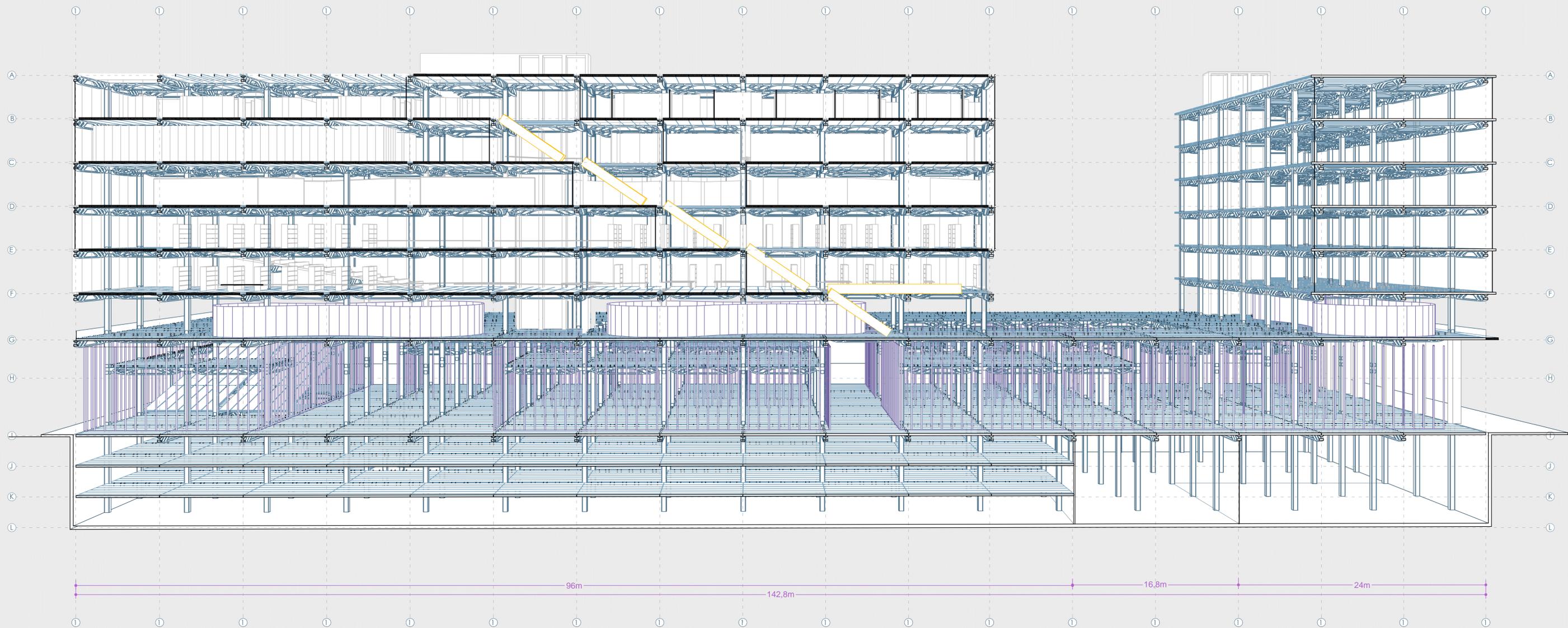
8vo nivel - Box dentales / Cafetería

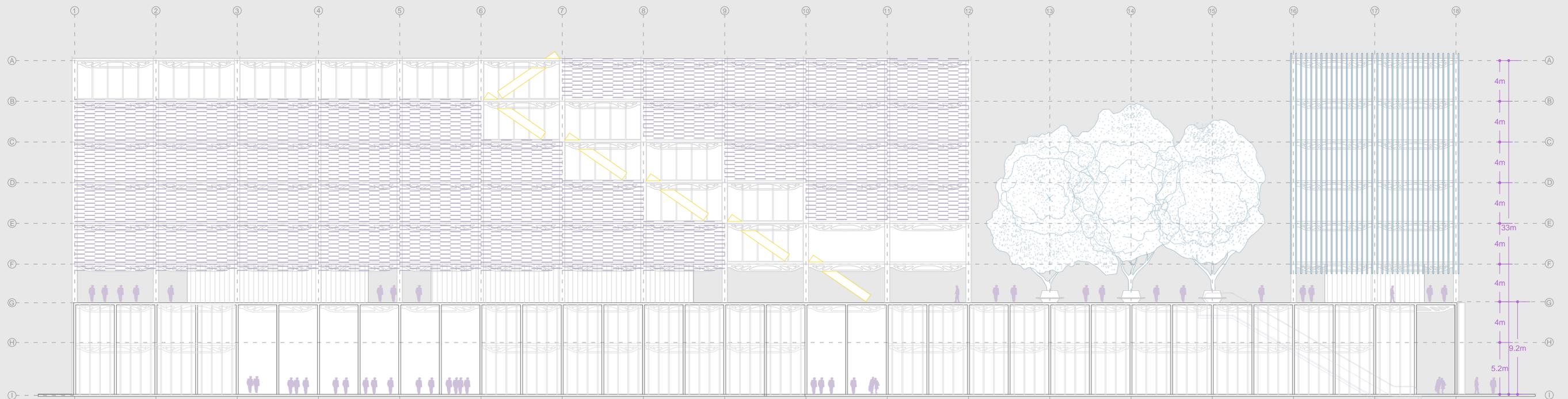


nivel cubierta



Luciano Lizana G.
 Núcleo de Equipamiento Santiago Poniente / Corte Transversal fugado





Elevación Norte

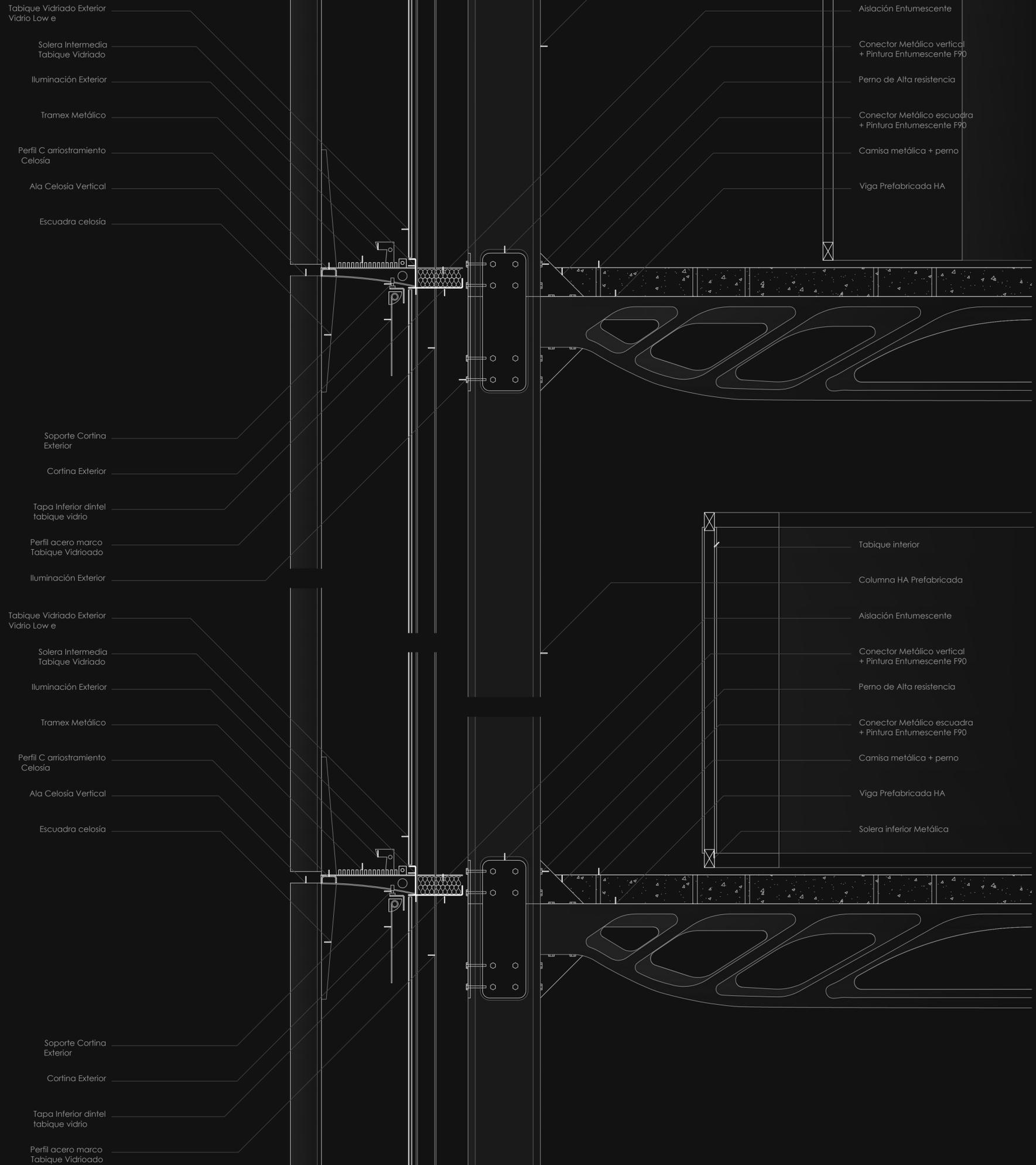


Elevación Poniente

Elevación Oriente



Detalle Constructivo





Vista Balcones / Atrios Escaleras



Vista Paseos comerciales / Columnata



Vista nivel Calle / Columnatas Exteriores