

# Criterios de estandarización modular aplicados en edificaciones multi-residenciales de madera contralaminada (CLT)

## *Modular standardization criteria applied in multi-story residential buildings in Cross-Laminated Timber (CLT)*

M. Vargas-Mosqueda\*<sup>1</sup> <http://orcid.org/0000-0002-4936-4249>

G. Saelzer-Fuica\* <https://orcid.org/0000-0002-4289-8379>

M. E. Pereira\*

A. M. Navarro-Ortiz\*

R. García-Alvarado\* <https://orcid.org/0000-0003-2216-2388>

\*Universidad del Bío-Bío, Concepción, CHILE

Fecha de Recepción: 05/10/2022

Fecha de Aceptación: 27/01/2023

Fecha de Publicación: 02/04/2023

PAG: 186-197

### Resumen

Las edificaciones multi-residenciales en altura en madera contralaminada se perfilan como una opción sustentable y rentable con posibilidades de industrialización, que abren el camino a nuevos paradigmas en la construcción. En este nuevo modelo edificatorio, la modulación estandarizada puede ser una eficiente estrategia para integrar plataformas de diseño y manufactura. Sin embargo, la aplicación de esta estrategia requiere del estudio y desarrollo de metodologías que permitan alcanzar la flexibilidad de diseño necesaria para obtener adecuados niveles de producción y personalización. En función de esto, este trabajo analiza las condiciones de modularidad observadas en cinco edificaciones construidas entre el 2002 y el 2016, con el propósito de estudiar los criterios de estandarización implementados. Para lograrlo, se hace un análisis de la modularidad subyacente en el diseño y las condiciones de variación o repetición presentadas. En este sentido, se observó el uso de criterios de modularidad distintos entre las primeras experiencias desarrolladas y las edificaciones más recientes, dados por el avance tecnológico de los últimos años. La investigación, permite aproximarse al entendimiento de las condiciones de modularidad asociadas a estas edificaciones, como aporte al desarrollo de metodologías que optimicen el diseño para la manufactura y ensamblaje.

**Palabras claves:** Modularidad; Construcción industrializada; CLT; Edificaciones residenciales en altura; DfMA

### Abstract

*Multi-storey residential buildings in cross-laminated timber are emerging as a sustainable and profitable option with industrialization possibilities, that open the way to new paradigms in construction. In this new building model, the standardized modulation results in an efficient strategy to integrate design and manufacturing platforms. However, the application of this strategy requires the study and development of methodologies that achieve the necessary design flexibility to obtain adequate levels of production and customization. Based on this, this work analyzes the modularity conditions observed in five buildings built between 2002 and 2016, in order to study the standardization criteria implemented. To achieve this, an analysis is made of the underlying modularity in the design and the conditions of variation or repetition presented. In this sense, the use of different modularity criteria was observed between the first experiences developed and the most recent buildings, given by the technological progress of recent years. The research allows us to approach the understanding of the modularity conditions associated with these buildings, as a contribution to the development of methodologies that optimize the design for manufacturing and assembly.*

**Keywords:** Modularity; Industrialized construction; Cross-Laminated-Timber; Multi-Storey residential buildings, DfMA.

<sup>1</sup> Corresponding author:

Universidad del Bío Bío, Concepción, CHILE

E-mail: [mvargas@ubiobio.cl](mailto:mvargas@ubiobio.cl)

# 1. Introducción

La construcción de edificaciones multi-residenciales usando madera contralaminada como material estructural principal, se inicia en Europa en la primera década del 2000 con algunas edificaciones de baja altura. A partir de ello, esta tecnología constructiva evoluciona rápidamente permitiendo la erección de edificios de mayor altura como el Stadhouse, con nueve pisos, construido en Inglaterra en el año 2009; el Holz 8, con ocho pisos, construido en Alemania y el Forté, de 10 pisos, construido en Australia en el año 2012.

Con la construcción de estas edificaciones surge un nuevo paradigma en la industria de la construcción mundial, al introducirse una tecnología sustentable e industrializada que posiciona a la madera como el único material carbono negativo existente en el planeta que permite construir edificaciones en altura (Smyth, 2018) y que además, puede aportar eficiencia a la construcción en términos de industrialización.

Dada la condición prefabricada de estas edificaciones, en su proceso de diseño se podrían adoptar metodologías de Diseño para la Manufactura y Ensamblaje (DfMA en sus siglas en inglés), usadas originalmente en productos de manufactura industrial (Staub-french et al., 2018), que han sido sugeridas adaptar a la industria de la construcción. Bajo esta metodología, tanto la prefabricación en planta, como el ensamblaje en sitio, de cada uno de los componentes constructivos, son tomados en cuenta desde el inicio del proceso de diseño (Gao et al., 2018) (Gao et al., 2019).

En este proceso, la modularidad del producto, entendida como la descomposición de un producto en bloques constructivos (módulos), unidos por interfaces específicas y manejados según criterios de manufactura (Erixon, 1996), resulta fundamental (Shafiee et al., 2020a). Sin embargo, aun cuando ésta representa una condición importante para el diseño y construcción de edificaciones industrializadas, existen todavía desconocimiento en cuanto a su aplicación y manejo general (Da Rocha et al., 2015). En el campo específico de edificaciones construidas en madera contralaminada, las estrategias de modularidad podrían responder a condiciones generales de industrialización, ya sea por panelización (2 dimensiones) o por elementos volumétricos (3 dimensiones) (Koppelhuber et al., 2017). Sin embargo, dado lo novedoso de esta tecnología, hasta ahora no existen estudios sobre la modularidad de edificaciones en altura hechas en este material (Dorrah y El-Diraby, 2019). En este sentido se considera que la eficiencia en el diseño para la manufactura y ensamblaje debe considerar criterios de modularidad que permitan, tanto la personalización del diseño (variación de soluciones), como la estandarización de componentes constructivos (repetición de elementos). Esto último en razón de reducir el número de piezas totales, lo que conlleva a reducir tiempos de fabricación y mejorar la eficiencia (Kremer, 2018) (Shafiee et al., 2020a).

La estandarización constructiva es una estrategia importante que permite la reutilización posterior del diseño, y se refiere a una situación en la que múltiples componentes constructivos son reemplazados por uno solo que puede realizar las funciones de todos ellos (Pakkanen et al., 2016), y pueda recuperarse consecutivamente. De esta manera, la modularización incluye definiciones de módulo e interfaces para reducir la complejidad en las operaciones de una empresa. En función de lo anterior, esta investigación busca estudiar las condiciones de modularidad y estandarización subyacente en edificaciones multi-residenciales ya construidas en CLT, con la finalidad de aportar un conocimiento que contribuya a mejorar los procesos de diseño para la manufactura y ensamblaje de estas edificaciones. A partir de la experiencia práctica acumulada en las construcciones ya realizadas con esta tecnología.

Para llevar a cabo la investigación, se tomaron como casos de estudio cinco edificaciones construidas en distintos países, que demuestran la aplicación de ésta tecnología y cuentan con documentación de respaldo. A partir de esto, se comenzó por analizar y categorizar las modulaciones observadas tanto a nivel arquitectónico-espacial, como constructivo (muros), considerando especialmente criterios de repetición. El análisis se hizo a partir del estudio de las plantas típicas, consideradas como aquellas de mayor repetición en la edificación. Para determinar las modulaciones de los muros, se aplicó una metodología basada en ingeniería inversa, que consistió en deducir las dimensiones de estos elementos en función de condiciones ideales. Por último, se procedió a determinar la relación existente entre los criterios de repetición modular observados y la flexibilidad de diseño alcanzada.

# 2. Método

La investigación se centra en el estudio de las condiciones de modularidad de edificaciones ya construidas. Esto se hizo a partir del análisis de sus plantas típicas, entendiendo por estas, aquellas que se repiten mayormente en la edificación.

En función de esto, se parte con una metodología exploratoria, sustentada en una búsqueda documental en línea a través de buscadores web, con la finalidad de identificar edificaciones que cumplieran con las características requeridas en el contexto mundial. Para esto se usaron palabras claves en español e inglés asociadas a la temática de investigación que condujeron a distintas fuentes de información, como artículos de investigación, magazines web, catálogos digitales y videos, que proporcionaron la información básica requerida para el estudio como planos, detalles constructivos, fotografías, imágenes, entre otros.

Siendo que las plantas típicas de las edificaciones construyeron una de las principales fuentes de estudio, estas fueron digitalizadas con un programa comercial de diseño asistido por computador, usando como punto de partida imágenes obtenidas por los medios anteriormente descritos. Para esto se tomó como base una dimensión estándar de huella en escaleras de 300 mm, estimándose un rango de error aproximado entre de +/- 5 y 10 mm por metro, el cual se consideró aceptable para los efectos de la investigación, tomado en cuenta que el método de análisis propuesto no se centra en medidas exactas, sino en proporciones. A partir de esta información, se identificaron y categorizaron las distintas modulaciones funcionales observadas a nivel arquitectónico-espacial, considerándose estas como aquellas unidades espaciales con funciones independientes. Luego se procedió a evaluar las condiciones de repetición de estas. Los datos fueron plasmados en una Tabla resumen (Tabla 3) tomando en cuenta como variables independientes a las categorías de módulos identificadas y como variables dependientes las siguientes:

- 1- Total de módulos: Refiriéndose a la cantidad total de módulos según categoría, observados en la planta típica.
- 2- Cantidad de tipos de módulos: Refiriéndose a la cantidad de tipologías de módulos distintas observadas por categoría.
- 3- Tipos de módulos: La cual indica la codificación definida para cada tipo de módulo según categoría. Esta se establece solo con la intención de lograr una mejor visualización de los datos en la Tabla, identificando con la letra “T” a los tipos de módulos, *p. ej.*: T1, T2, T3... Tn, según los tipos observados.
- 4- Repeticiones según tipo de módulo: Se refiere a la cantidad de repeticiones observadas por cada tipo de módulo.
- 5- Repetición en espejo: Se refiere a si la condición de repetición es simétrica o exacta, estableciéndose la palabra “SI” para la primera y la palabra “NO” para la segunda.
- 6- Porcentaje de repetición de módulos: toma en cuenta la relación entre los módulos repetidos y la cantidad de módulos totales observados.

Por último, en la (Tabla 3) se establecen valores promedios en cuanto a tipos de módulos, repetición según tipo de módulo y porcentaje de repetición de módulos.

Cabe destacar que la simetría en espejo, observada en la repetición de algunos módulos, fue tomada como válida, sin dejar de considerar que, si bien representa una condición de igualdad constructiva en cuanto a dimensiones, formas y cantidad de material, esta puede implicar ciertas variaciones en cuanto a la ubicación y configuración de instalaciones de servicios.

En segundo lugar, se analizaron las condiciones de variabilidad o repetición observadas en muros (Tabla 4). En función de esto, debido a que la información obtenida a través de internet no condujo a datos precisos sobre medidas y condiciones de configuración, se aplicó un proceso de ingeniería inversa en cada caso de estudio, el cual permitió deducir dimensiones y configuraciones lógicas de muros por panelización (2 dimensiones) según condiciones ideales de diseño, manufactura y ensamble, aplicadas a este tipo de edificaciones. De esta manera, sobre cada planta típica, se dedujeron distintos tipos de muro (paneles) siguiendo una categorización inicial que diferenció los muros interiores de los muros de fachada. Dichos elementos constructivos fueron codificados para proceder luego a una evaluación de sus condiciones de repetición. Cabe destacar que para esta primera aproximación metodológica se cuantificaron solo muros interiores. Los datos se recogieron en una Tabla (Tabla 4) tomando en cuenta como variables independientes los tipos de muros interior observados y como variables dependientes, la cantidad de repeticiones por tipo de muro observadas en cada caso de estudio. Para facilitar la visualización de los datos en la Tabla se estableció una nomenclatura que permite identificar los tipos de módulos según categoría a partir de la letra “T”, estipulando, por ejemplo: T1, T2, T3... Tn, según los tipos de muro observados. Por último, se cuantificaron las siguientes variables dependientes: 1) total de muros; 2) total de tipos de muro; 3) promedio de repeticiones por tipo de muro; 4) valor de repetición mayor; 5) porcentaje de muros únicos; 6) porcentaje de muros en repetición.

## 2.1 Casos de estudio

Como se ha dicho, la investigación se lleva a cabo a partir del estudio de un grupo de edificaciones multi-residenciales en CLT, con alturas entre 4 y 8 pisos que expresaran la experiencia y capacidad tecnológica mundial en distintos contextos y años de construcción. Para seleccionarlas se procedió, en primer lugar, a realizar una búsqueda por internet entre los meses de noviembre y diciembre de 2020, en la cual se identificaron diecisiete casos que cumplieran con las características de uso, número de pisos y tecnología constructiva requeridas. A partir de ello las edificaciones fueron enumeradas tomando en cuenta nombre, año de construcción, ubicación, uso, número pisos y tecnología constructiva, considerándose dentro de estas categorías los usos mixtos, principalmente residenciales y sistemas híbridos CLT/hormigón, siendo el CLT el material estructural principal (Tabla 1).

*Tabla 1. Primer listado de edificaciones.*

Nro	Edificación	Año	Ubicación	Uso	Nº Pisos	Tecnología Constructiva
01	Frauengasse	2002	Judenburg, Austria	Residencial	4	Placas CLT
02	Holz Passivhaus	2006	Viena, Austria	Residencial	5	Placas CLT
03	Limnologen	2009	Växjö, Suecia	Residencial	8	Placas CLT
04	Stadthaus	2009	Londres, Inglaterra	Residencial	9	Placas CLT
05	Holz8 (H8)	2011	Bad Aibling, Alemania	Residencial	8	Híbrido Placas CLT / Hormigón
06	Forte	2012	Melbourn, Australia	Residencial /comercial	10	Híbrido Placas CLT / Hormigón
07	Fernpassstrasse	2012	München, Alemania	Residencial	4	Placas CLT
08	Wagramerstrasse	2013	Viena, Austria	Residencial	7	Híbrido Placas CLT / Hormigón
09	Pentagon II	2013	Oslo, Noruega	Residencial	8	Híbrido Placas CLT / Hormigón
10	Cenni di Cambiamento	2013	Trieste, Italy	Residencial	9	Placas CLT
11	Panorama Giustinelli	2013	Trieste, Italia	Residencial	7	Híbrido Placas CLT / Hormigón
12	Strandparken	2014	Vlughtenburg, Suecia	Residencial	8	Placas CLT
13	The Jules Ferry Tower	2014	Saint Dié des Vosges, Francia	Residencial	8	Placas CLT
14	Puukuokka	2015	Jyväskylä, Finlandia	Residencial	6 -8	Placas CLT
15	Hummelkaserne	2016	Graz, Austria	Residencial	6	Placas CLT
16	Kanalen Bryggr	2020	Tønsberg, Noruega	Residencial	5	Placas CLT
17	Bike and Ride	2020	Viena, Austria	Residencial	6	Placas CLT

De este primer grupo se seleccionaron cinco edificaciones (Tabla 1) y (Tabla 2) que representarían un 30% aproximado de las edificaciones inicialmente identificadas, tomando en cuenta que constituyeran una variedad representativa en cuanto a altura, forma, configuración funcional y evolución en el tiempo. Este número se consideró suficiente para una primera aproximación metodológica. Si bien son pocas, expresan la principal experiencia y capacidad tecnológica mundial en el tema, por lo que se considera relevante analizarla. Cabe destacar que como criterio importante de selección se consideró el año de construcción, de manera que expresaran una evolución en el tiempo (Tabla 2), así como la mayor cantidad y calidad de documentación que aportaran, por ejemplo: planimetrías, detalles constructivos, procesos de manufactura y ensamblaje.

**Tabla 2.** Casos de estudio y años de construcción

CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
<b>Frauengasse</b>	<b>Holz Passivhaus</b>	<b>Holz8 (H8)</b>	<b>Strandparken</b>	<b>Hummelkaserne</b>
				
2002	2006	2011	2014	2016

### 2.1.1 Descripción de los casos de estudio.

**Residencias Freuengasse:** Fue construida en el año 2002 en Judenburg, Austria. Es una edificación de cuatro pisos conformada por tres núcleos de departamentos con accesos independientes. Aun cuando es de uso mayormente residencial, su primera planta se destina a comercio. Tiene un total de 22 departamentos. Esta edificación fue construida casi totalmente en paneles de CLT, con excepción de las cajas de escaleras, las cuales fueron construidas en hormigón.

El proyecto total posee una extensión de 1.800 m<sup>2</sup> y contó con una inversión total de 2.400.000 €, por lo que se estima una inversión total aproximada en el proyecto de 1.333 €/m<sup>2</sup>. (“Hagmüller Architekten ZT GmbH,” n.d.) (“Multi-residencial CLT in Judenburg Austria | WoodSolutions,” n.d.)

**Residencias Holz Passivehaus:** Se encuentra emplazada en Mühlweg, Viena. Es un complejo de edificios que consta de setenta unidades residenciales distribuidas en seis edificaciones de cinco pisos, construidas bajo el estándar passivehause y bajo un concepto amigable con el medio ambiente. Fue construido en CLT en su totalidad. Los pisos correspondientes a semisótano y primer piso junto al núcleo central de circulación vertical fueron construidos en hormigón. El resto de los pisos fueron construidos en CLT.

El proyecto total se desarrolló en una extensión 6.750 m<sup>2</sup> en donde se invirtieron 11.000.000 €. Se estima un costo total aproximado de inversión de 1.630 €/m<sup>2</sup>. (“Sozialer Wohnbau, Holz-Passivhaus am Mühlweg, 1210 Wien - Haus der Zukunft,” n.d.)

**Holz 8:** Esta edificación fue construida en Bad Aibling, Alemania. Posee ocho pisos con un total de 16 departamentos (2 por pisos). Su volumen principal fue construido en CLT núcleo de circulación vertical en hormigón. Fue una edificación construida aplicando altos niveles de industrialización, lo que permitió alcanzar un tiempo de ensamblaje en sitio de tres semanas y media. El proyecto abarca una superficie total de 1.309 m<sup>2</sup> y su costo de inversión total fue de 2.500.000 €, por lo que se estima un costo total aproximado de inversión de 1.533 €/m<sup>2</sup>. (“Holz 8 - edificio residencial y de oficinas, DE: dataholz.eu,” n.d.)

**Strandparken:** Se ubica en Estocolmo, Suecia. Consta de cuatro edificios de 8 pisos más buhardilla, con 31 departamentos cada uno, de los cuales dos fueron construidos en su totalidad en CLT.

El proyecto se edificó en una extensión total de 9.920 m<sup>2</sup> y contó con una inversión total de 200 millones de coronas suecas (19.670.000 € aprox.), por lo que se estima un costo total aproximado de inversión de 1.982 €/m<sup>2</sup>. (“Strandparken | ByggfaktaDOCU.se,” n.d.)

**Residencias Hummelkaserne:** Se encuentra ubicado en Graz, Austria. Es un complejo residencial de cuatro edificaciones de seis pisos con un total de 92 departamentos diseñados bajo el estándar de casa pasiva. Casi en su totalidad fue construido con placas de CLT, con excepción del núcleo de circulación vertical y acceso.

El proyecto total se desarrolló en una extensión 5.695 m<sup>2</sup> y se invirtieron 4.850.000 €, por lo que se estima un costo total aproximado de inversión de 851 €/m<sup>2</sup>. (Guttmann, n.d.)

## 3. Resultados

En los casos estudiados se observaron modulaciones subyacentes a nivel arquitectónico-espacial y constructivo, identificándose categorías según tamaño y funcionalidad que responden a un principio de composición jerárquica, donde los módulos mayores son compuestos y configurados a partir de módulos menores. Las categorías de módulos identificadas son (Figura 1): 1- Núcleo residencial, el cual se definen como una unidad funcional, que aloja varias unidades residenciales y que constan de un núcleo de circulación vertical independiente; 2- Núcleo de circulación vertical y acceso común; 3- Unidad residencial o vivienda; 4- Recinto. En cada categoría, dependiendo del caso de estudio, se observaron distintas condiciones de repetición o variación determinada por el nivel de flexibilidad arquitectónica observada. Una condición de repetición observada fue la de simetría en espejo. En la categoría de recintos se identificaron las siguientes tipologías de módulos según función: 1- Living-comedor, 2- Living-comedor-cocina; 4- Cocina; 4- Dormitorios 5- Baños; 6- Balcones.

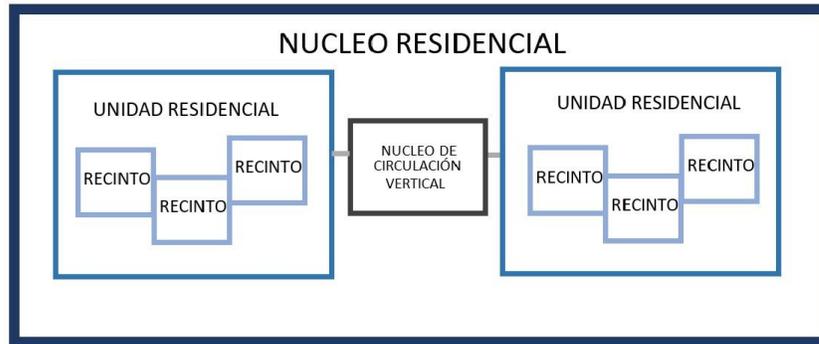


Figura 1. Categorías de módulos observadas. Fuente: elaboración propia.

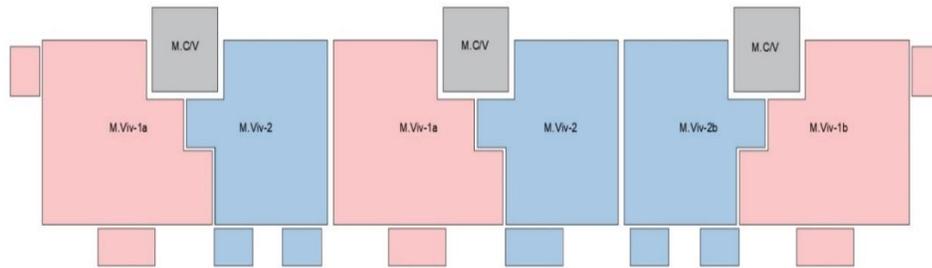


Figura 2. Caso 1. Residencias Frauengasse. Modulación de Unid. Residenciales.

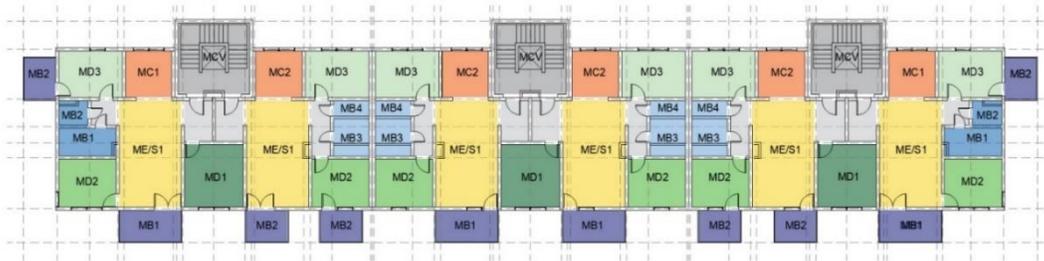


Figura 3. Caso 1. Residencias Frauengasse. Modulación espacial. Fuente: Elaboración propia.

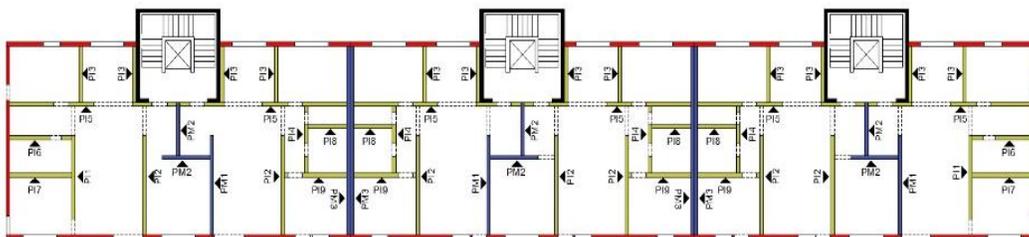


Figura 4. Caso 1. Residencias Frauengasse. Modulación de muros interiores. Fuente: Elaboración propia.

ENGLISH VERSION.....



Figura 5. Caso 2. Res. Passivhouse. Modulación de Unid. Resid. Fuente: Elaboración propia.

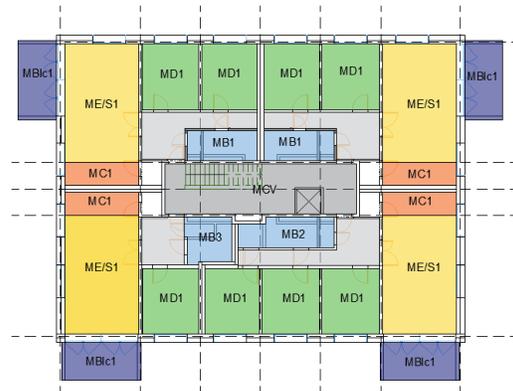


Figura 6: Caso 2. Res. Passivhouse. Modulación espacial. Fuente: Elaboración propia.

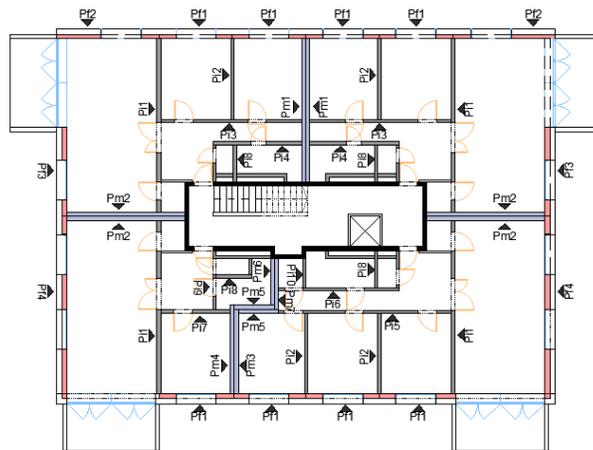


Figura 7. Caso 2. Res. Passivhouse. Modulación de muros interiores. Fuente: Elaboración propia.

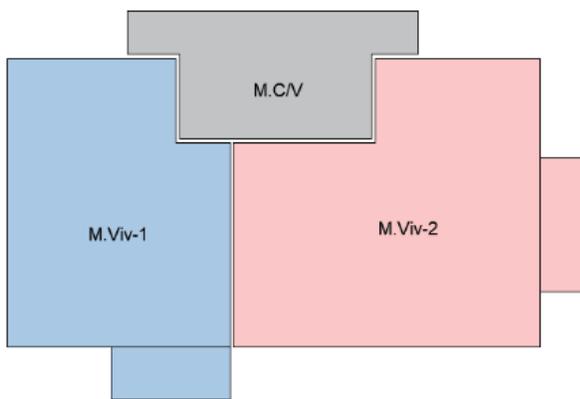
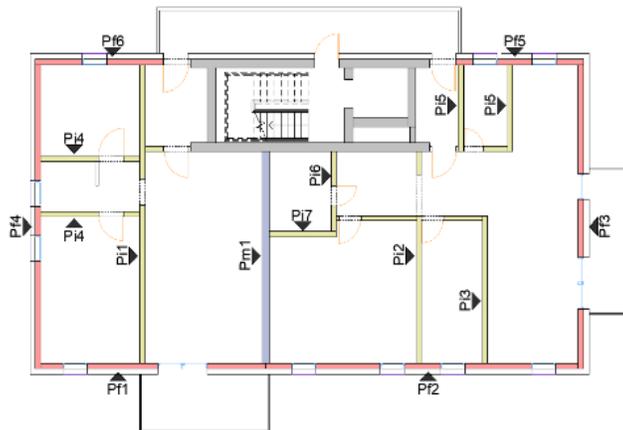


Figura 8. Caso 3. Res. Holz 8. Modulación de Unid. Resid. Fuente: Elaboración propia.



Figura 9. Caso 3. Res. Holz 8. Modulación espacial. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 10.** Caso 3. Res. Holz 8. Modulación de muros interiores. Fuente: Elaboración propia.

### 3.1 Resultados según casos:

#### Caso 1: Frauengasse

La edificación completa se compone de tres módulos de núcleos residenciales iguales, unidos en forma longitudinal. Cada uno de ellos con módulos de circulación vertical independientes construidos en hormigón y con iguales características en cuanto a forma y configuración funcional (Figura 2). Con respecto a las unidades residenciales se observaron dos tipos distintos que se repiten tres veces cada una, para un total de seis. De estas solo una aparece repetida en espejo. En cuanto a los recintos, se observa la repetición constante de los módulos de Cocina y Living/Comedor en cada una de las seis unidades residenciales. Igualmente existe un patrón de repetición alto en los módulos Dormitorios, Baños y Balcones (Figura 3) (Tabla 3).

Con respecto a los muros interiores, se deducen 56 muros en total, distinguiéndose 12 tipos distintos (Figura 4) (Tabla 4), con un promedio de repetición de 4,7, siendo 12 el valor de repetición más alto y 2 el más bajo. El porcentaje de muros repetidos es de 100% (Tabla 4).

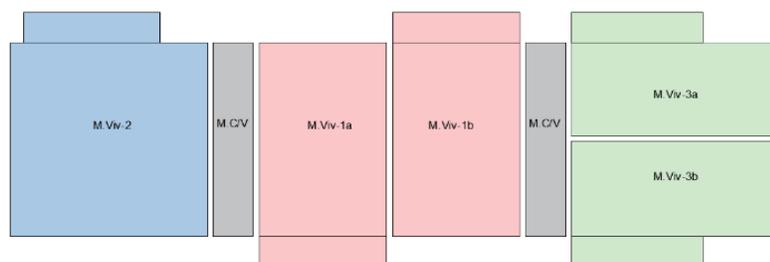
La edificación se compone de un solo núcleo residencial compuesto por cuatro unidades residenciales que responden a tres tipos de módulos distintos. De estos, uno se repite en espejo para completar las cuatro unidades totales que se configuran en torno a un núcleo de circulación vertical central construido en hormigón (Figura 5). Posee una modulación muy regular con un alto patrón de repetición en los recintos, observándose solo variantes en los recintos de baño, que obedecen a tres tipos de módulos distintos de los cuales una solo se repite en espejo (Figura 6) (Tabla 3).

Con respecto a los muros interiores, en esta edificación se pudieron identificar 33 tipos de muros en total, distinguiéndose 17 tipos distintos con un promedio de repetición de 1,94, siendo 4 el valor más alto de repetición y 2 el más bajo. Asimismo, se observan 9 muros únicos dentro de la planta típica y un porcentaje de muros repetidos del 73% (Tabla 4).

#### Caso 3: Holz 8.

El edificio Holz 8 se compone de un solo núcleo residencial compuesto por dos unidades residenciales distintas, servidas por un núcleo de circulación vertical dispuesto en forma lateral (Figura 8). Cada unidad residencial presenta una modulación de recintos totalmente diversa sin repeticiones (Figura 9).

En cuanto a los muros interiores, en la planta típica, de área bastante reducida, se identifican 10 muros en total con solo 2 en repetición. Es decir, se observa un alto grado de variación de muros con un porcentaje de muros únicos del 60% contra un 40% de muros en repetición, con un promedio de 1,24 (Figura 10) (Tabla 4).



**Figura 11.** Caso 4. Res. Strandparker. Modulación de Unid. Resid. Fuente: Elaboración propia.

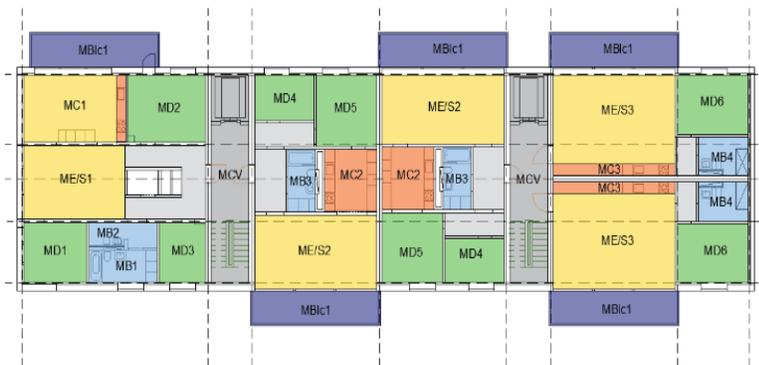


Figura 12. Caso 4. Res. Strandparker. Modulación espacial. Fuente: Elaboración propia.

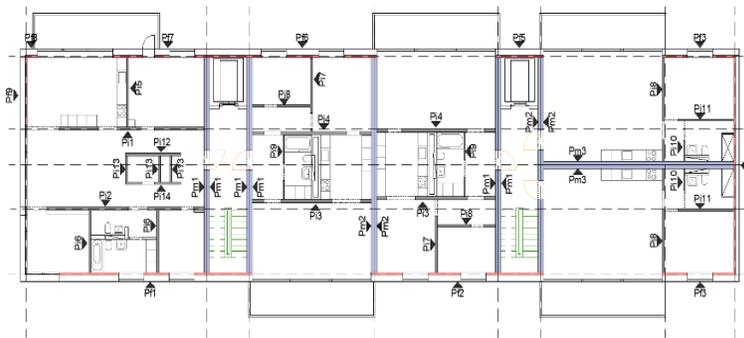


Figura 13. Caso 4. Res. Strandparker. Modulación de muros interiores. Fuente: Elaboración propia.

**Caso 4: Strandparker**

La edificación completa comprende dos módulos correspondientes a núcleos residenciales distintos, unidos en forma longitudinal. Cada uno de ellos presenta un módulo de circulación vertical ubicados transversalmente dentro del volumen total (Figura 11) con iguales características. Esta edificación presenta un patrón de repetición modular muy escaso (Tabla 3). Con respecto a las unidades de vivienda se observan tres tipos distintos de los cuales dos de ellos se repiten en espejo dando lugar a un total de cinco viviendas por planta típica. La repetición de recintos es muy poca, lo que refleja una alta flexibilidad en el diseño (Figura 12) (Tabla 3). Solo se observa un patrón de repetición modular constante en los balcones.

En cuanto a los muros interiores se identifican 34 muros en total y 17 tipos de muros. Asimismo, se observa un valor máximo de repetición de 6 y un mínimo de 2, siendo este último el valor que más aparece, observándose en 10 tipos de módulos de los 17 existentes en total. El porcentaje de muros únicos es de 15% frente a un porcentaje de muros en repetición del 85%, pero con un bajo índice de repetición como se expresó anteriormente (Tabla 4).



Figura 14. Caso 5. Res. Hummelkazerne. Modulación de Unid. Resid. Fuente: Elaboración propia



Figura 15. Caso 5. Res. Hummelkazerne. Modulación espacial. Fuente: Elaboración propia.

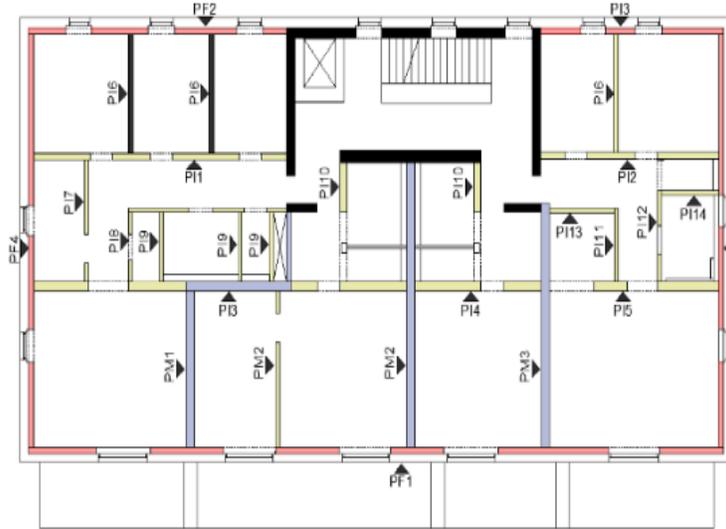


Figura 16. Caso 5. Res. Hummelkaserne. Modulación de muros interiores. Fuente: Elaboración propia.

### Caso 5: Hummelkaserne

En esta edificación se observa un solo núcleo residencial que contiene cuatro tipos de unidades residenciales distintas. Estas últimas a su vez están compuestas de varios tipos de módulos de recintos (Figura 14). El núcleo de circulación vertical se posiciona en forma lateral dentro de la planta, pero inserto dentro del volumen total. Se observa un patrón de repetición muy bajo en la mayoría de los módulos de recintos, exceptuando los Balcones, los cuales presentan una repetición constante. Del total de siete dormitorios en toda la edificación, se observa un módulo tipo en particular que se repite tres veces y otro solo dos veces (Tabla 3). En los baños solo se observan dos tipos de módulos, de los cuales uno se repite en espejo y el otro se repite igual, pero en rotación de 90° (Figura 15). Con respecto a los muros interiores, se observa un bajo patrón de repetición (Figura 16). Se identifican 22 muros en total y 16 tipos de muros distintos con un valor de repetición máximo de 3 y un alto número de muros únicos. En total se cuantifica un porcentaje de muros únicos del 55% frente a un 45% de muros en repetición (Tabla 4).

Tabla 3: Condiciones de modulación arquitectónica-espacial según caso. Elaboración propia.

T-Tipo de módulo	Caso 1 Frauengasse		Caso 2 Holz-Passivhaus		Caso 3 Holz 8		Caso 4 Strandparker		Caso 5 Hummelkaserne	
	Total de Módulos	% Repetición de módulos	Total de Módulos	% Repetición de módulos	Total de Módulos	% Repetición de módulos	Total de Módulos	% Repetición de módulos	Total de Módulos	% Repetición de módulos
<b>Núcleo Residencial</b>	3	100%	1	100%	1	100%	2	100%	1	100%
<b>Núcleo de Circulación Vertical</b>	3	100%	1	100%	1	100%	2	100%	1	100%
<b>Unidad Residencial</b>	6	50%	4	50%	2	100%	4	50%	4	50%
<b>Living</b>							1	100%		
<b>Living/Comedor</b>	6	100%			2	100%	2	100%	4	50%
<b>Cocina</b>	6	67%			2	100%	2	100%	3	100%
<b>Living/Comedor/Cocina</b>			4	100%			2	100%		
<b>Dormitorios</b>	15	40%	8	100%	4	100%	9	22%	7	43%
<b>Baños</b>	12	33%	4	100%	3	100%	3	0%	4	50%
<b>Balcones</b>	10	60%	4	100%	2	100%	4	100%	5	100%
Promedio de tipos de módulos	2,00		1,57		2,00		2,10		2,25	
Promedio de repetición según tipo de módulo	3,81		2,36		1,06		1,62		1,61	
Promedio de porcentaje de repetición de módulos		50%		36%		6%		29%		19%

## 4. Discusión

El análisis realizado en cada caso de estudio se hizo, tanto a nivel de modulación arquitectónica-espacial, como a nivel de modulación constructiva, específicamente de muros, tomando en consideración que el diseño de edificaciones industrializadas requiere de una coordinación modular entre las dimensiones de los espacios y las dimensiones de los componentes constructivos (Jensen et al., 2015). En el proceso de diseño esta coordinación se establece usualmente a través del uso de retículas de ejes para el trazado del diseño base que definen la ubicación y tamaño de elementos constructivos, o bien a través de la consideración de distanciamientos máximos entre componentes constructivos (Habraken, 2008). En este sentido, cabe

destacar que en ninguno de los casos estudiados se observó el uso de una retícula regular (es decir de medidas iguales y repetitivas en cada sentido) como base para la definición de una modulación estándar de espacios y elementos constructivos. En estas, la configuración y dimensionamiento de espacios y muros en general, responden a esquemas flexibles restringidos por las distancias entre apoyos o luces máximas que pueden resistir las placas de entepiso y el ancho funcional de los recintos. Esto considera los muros de fachada como muros de carga, de manera que, la ubicación y configuración en planta de los muros interiores se flexibiliza, respondiendo solo a la distribución de los espacios interiores. En cuanto a la estandarización modular a nivel arquitectónico-espacial, se observan variadas aplicaciones según cada caso. Sin embargo, es importante destacar que en solo dos de las edificaciones (Frauengasse y Holzpassivhaus) se observó una alta repetición de medidas en las modulaciones (Tabla 3).

En cuanto a las unidades residenciales o departamentos de viviendas, se observó una intención común de garantizar una diversidad de opciones por planta típica, determinada seguramente por el mercado inmobiliario. En estos casos, el mayor número de repeticiones observado por tipos de módulos fue 2 (Tabla 3), las cuales, en su mayoría, se hacen mediante repetición en espejo (simetría axial). Solo se observaron dos casos sin repeticiones de unidades residenciales, el Holz 8 y el Hummelkaserne (Tabla 3).

Con respecto a los módulos de circulación vertical, se observaron variadas configuraciones. Estos, corresponden a núcleos de hormigón que se disponen de tres formas: 1- central; 2- lateral-longitudinal; 3- transversal-intermedia. En los casos donde se repiten, esto se hace de dimensiones idénticas en otra posición.

En cuanto a los recintos, las categorías más repetidas en todos los casos fueron los espacios de uso común como: living-comedor, cocina, dormitorios y balcones (Tabla 3), con excepción del Strandparker, en el cual sólo se observó un patrón alto de repetición en balcones. Es importante acotar, que el uso de modulaciones de recintos en forma repetida, se observa más en edificaciones de menor altura (Tabla 5). Esto, en primer lugar, parece un criterio asociado a la reducción de costos de construcción (por consistir en bloques residenciales en suburbios de menor renta), y en segundo lugar puede producirse por un criterio asociado a que, a mayor cantidad de pisos, la estandarización espacial y la constructiva (en este caso muros) en una misma planta típica, deja de ser relevante para la construcción y se enfoca en la repetición por pisos. Sin embargo, es importante destacar el caso del Hummelkaserne, cuya construcción es algo más reciente (año 2016). En esta edificación el diseño arquitectónico-espacial no responde a criterios de repetición de recintos, observándose una planta con un diseño bastante flexible. Esto podría originarse por el avance tecnológico alcanzado en los procesos de diseño y manufactura de estas edificaciones en los últimos años, que permiten mayor diversidad en costos similares.

En cuanto a la modulación constructiva en muros, el criterio aplicado en todos los casos, fue el de la configuración de las placas en dos dimensiones (panelización); en ninguna de las edificaciones se aplicaron estrategias que involucrarán módulos volumétricos (elementos tridimensionales prefabricados). Como se ha dicho anteriormente, uno de los desafíos actuales de la construcción industrializada es reducir y estandarizar la mayor cantidad de componentes constructivos requeridos, garantizando al mismo tiempo la autonomía y personalización del diseño (Viana et al., 2017) (Viklund, 2017) (Kremer, 2018). En este sentido, en el caso 4 (Strandparker), se observó un diseño de planta flexible, pero este al mismo tiempo, presenta el segundo mejor promedio de repetición de tipos de muro (Tabla 4) (Tabla 5), lo que permite concluir que, de los casos estudiados, este es el que aplica una mejor combinación de modularidad para una la personalización masiva. En función de esto, los casos menos eficientes fueron el Frauengasse y el Holz 8. El primero, con poca flexibilidad de diseño y alto nivel de repetición de muros y el segundo, con una flexibilidad total, pero con muy poca repetición. Sin embargo, es importante observar que el Holz 8, aun cuando no presenta altas repeticiones de módulos de muro, posee ocho pisos de altura (Tabla 5), lo que refuerza la evidencia de un criterio de repetición asociado al número de pisos, y no en la planta típica.

**Tabla 4:** Estandarización modular en muros interiores según casos. Elaboración propia

Cantidad de repeticiones por tipo de muro según caso	Tipos de muro interior												Total de muros	Total de tipos de muro	Promedio de repetición por tipos de muro	Valor de repetición mayor	Cantidad de muros únicos	Porcentaje de muros únicos	Porcentaje de muros con más de una repetición
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12							
<b>Caso 1</b> Frauengasse	6	7	2	2	2	4	4	12	4	4	3	6	56	12	4,67	12	0	0	100%
<b>Caso 2</b> Holz Passivhaus	4	4	2	2	1	1	1	4	1	1	2	4	33	17	1,94	4	9	27%	73%
<b>Caso 3</b> Holz 8	1	1	1	2	2	1	1	1					10	8	1,25	2	6	60%	40%
<b>Caso 4</b> Strandparker	1	1	2	2	1	2	2	2	2	2	2	1	34	17	2,00	6	5	15%	85%
<b>Caso 5</b> Hummelkaserne	1	1	1	1	1	3	2	1	1	3	2	1	22	16	1,38	1	12	55%	45%

Tabla 5: Cuadro resumen. Elaboración propia

	Año de construcción	Cantidad de edificaciones construidas.	Número de pisos	Cantidad de departamentos por edificio	Cantidad de departamentos totales del proyecto.	Cantidad de departamentos por planta tipo.	Condición de financiamiento	Inversión total proyecto (euros)	Costo de inversión por m <sup>2</sup> (euros)	Promedio de repetición de recintos	Promedio de repetición de muros interiores
Caso 1 <b>Frauengasse</b>	2002	1	4	22	22	6	Subsidiado	2.400.000	1.300	4,08	4,67
Caso 2 <b>Holz Passivhaus</b>	2006	6	5	16	70	4	Subsidiado	11.000.000	1.630	3,33	1,94
Caso 3 <b>Holz 8</b>	2011	1	8	16	16	2	Privado	2.500.000	1.533	1,08	1,25
Caso 4 <b>Strandparken</b>	2014	2	8	31	62	5	Privado	19.670.000	1.982	1,73	2,00
Caso 5 <b>Hummelkaserne</b>	2016	4	6	23	92	4	Subsidiado	4.850.000	851	1,92	1,38

## 5. Conclusión

La investigación realizada constituye un nuevo aporte al estudio de la estandarización modular como estrategia aplicada en edificaciones multi-residenciales en CLT, con la finalidad de hacer más eficientes sus procesos de diseño y construcción.

El análisis y comparación de cinco edificaciones construidas en Europa entre los años 2002 y 2016, permitió aproximarse a conclusiones preliminares de importancia sobre estrategias complementarias de modularidad. Sin embargo, debe considerarse que la metodología implementada requiere ser aplicada a una mayor cantidad de casos para alcanzar resultados más concluyentes.

Por otro lado, debe mencionarse, que los casos estudiados, en su totalidad implementaron modulación constructiva por panelización (elementos constructivos de dos dimensiones repetidos), y no aplican módulos volumétricos (elementos tridimensionales prefabricados), en los cuales el uso de estrategias de estandarización arquitectónico-espacial y constructiva puede ser más exigente para el diseño.

En primer lugar, la investigación permitió establecer una diferenciación inicial entre la estandarización arquitectónico-espacial, como estrategia para alcanzar niveles eficientes de coordinación entre diseño y manufactura, y la estandarización constructiva, como estrategia para alcanzar niveles más eficientes de fabricación y montaje. En este sentido, el estudio revela las relaciones entre estas dos estrategias, en función de la optimización del proceso de diseño para la manufactura, y el ensamblaje durante la ejecución de las edificaciones en estudio.

En los casos estudiados, se observó una diferencia parcial entre el diseño de las primeras edificaciones construidas, las cuales presentan una mayor estandarización arquitectónico-espacial y constructiva, y las edificaciones construidas más recientemente, las cuales poseen diseños más flexibles y personalizados, con menores niveles de estandarización constructiva (Tabla 3), (Tabla 4) y (Tabla 5). Esto puede evidenciar una evolución en los procesos de diseño y construcción de estas edificaciones en un corto periodo de tiempo, que puede ser atribuida al avance alcanzado en torno al diseño virtual (VD) y BIM, así como a la evolución del CLT como tecnología constructiva. Aspectos que han permitido establecer coordinaciones más eficientes entre las plataformas de diseño y plataformas de manufactura.

En el diseño de los casos más antiguos, como las residencias Frauengasse y Holz Passivehause, construidas con financiamiento público, en los años 2002 y 2004 respectivamente, se observa una alta repetición arquitectónico-espacial (Tabla 5). Esto evidencia el uso de criterios simultáneos de estandarización, tanto a nivel arquitectónico-espacial, como a nivel constructivo, con el fin de optimizar procesos de industrialización, pero que reducen las variaciones de diseño habitacional.

Por otro lado, en las edificaciones construidas más recientemente, se observa una menor estandarización, tanto arquitectónico-espacial como constructiva a nivel de planta típica, lo que evidencia un cambio de criterios y estrategias que apunta hacia diseños arquitectónicos y procesos de manufacturas más flexibles. En este aspecto cabe destacar que, en las edificaciones con mayor cantidad de pisos, se observa una disminución de la estandarización arquitectónico-espacial y constructiva por planta típica, lo que evidencia un criterio de repetición de componentes constructivos por piso, que prima sobre la repetición por planta. Esto permite un mayor grado de flexibilidad en el diseño arquitectónico en la planta típica, conservando la estandarización constructiva como criterio para la optimización de procesos de manufactura y montaje. Sin embargo, es importante acotar que las residencias Hummelkaserne, construidas en el año 2016, aun siendo de baja altura, presentan una alta flexibilización de su diseño en planta, aunada probablemente a una reducción de costos de construcción en comparación con el resto de los casos estudiados. Esto evidencia un avance en la eficiencia alcanzada en la construcción de estas tipologías edificatorias en los últimos años en Europa.

Otro aspecto relevante observado en todos los casos estudiados, independientemente del nivel de flexibilidad del diseño en planta y del año de construcción, es la alta estandarización de balcones. Lo que revela la integración arquitectónica de espacios de relación con el exterior.

Por último es importante señalar que múltiples estudios han demostrado que la estandarización sigue siendo una estrategia eficiente para reducir los tiempos de entrega del proyecto (incluyendo el diseño), y optimizar procesos de manufactura, (Smith, 2016)(Shafiee et al., 2020b). Por lo que, aun cuando los últimos avances tecnológicos apuntan a alcanzar una alta flexibilidad, tanto en el diseño, como en los procesos de manufactura de las edificaciones en estudio; la aplicación de criterios de estandarización modular constructiva, puede ser una buena estrategia para la reducción, tanto de costos, como de desperdicios. Sin embargo, este último aspecto no se contempló dentro de los alcances de la investigación, por lo que resultaría importante considerarlo en futuros estudios.

De acuerdo con lo anterior, el uso de estrategias de estandarización constructiva que garanticen niveles aceptables de personalización del diseño, podría ser una alternativa para lograr soluciones más económicas y sustentables, con alta proyección inmobiliaria.

## 6. Agradecimientos

Agradecemos al Dr. Alexis Pérez-Fargallo y a la Dra. Laura Marín-Restrepo (Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño de la Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile) por la asistencia, comentarios y sugerencias durante el desarrollo del manuscrito.

## 7. Referencias

- Da Rocha, C. G.; Formoso, C. T.; Tzortzopoulos, P. (2015).** Adopting product modularity in house building to support mass customisation. *Sustainability (Switzerland)*, 7(5), 4919–4937. <https://doi.org/10.3390/su7054919>
- Dorrah, D.; El-Diraby, T. (2019).** Mass Timber in High-Rise Buildings: Modular Design and Construction. University of Toronto, 1.
- Erixon, G. (1996).** Design for Modularity. *Design for Modularity*, 356–379. [https://doi.org/10.1007/978-94-011-3985-4\\_18](https://doi.org/10.1007/978-94-011-3985-4_18)
- Gao, S.; Jin, R.; Lu, W. (2019).** Design for manufacture and assembly in construction: a review. *Building Research and Information*, 48(5), 1–13. <https://doi.org/10.1080/09613218.2019.1660608>
- Gao, S.; Low, S. P.; Nair, K. (2018).** Design for manufacturing and assembly (DfMA): a preliminary study of factors influencing its adoption in Singapore. *Architectural Engineering and Design Management*, 14(6), 440–456. <https://doi.org/10.1080/17452007.2018.1502653>
- Guttman, E. (2016).** Holzwohnbau Hummelkaserne Graz.
- Habraken, J. (2008).** Design for flexibility. *Building Research & Information*, 36(3), 290–296. <https://doi.org/10.1080/09613210801995882>
- Hagmüller Architekten ZT GmbH. (1999).** Retrieved April 16, 2021, from <http://www.hagmueller.com/en/portfolio/frg-12-frauegasse-iii-2/>
- Dataholz.eu - edificio residencial y de oficinas. (2011).** Retrieved April 16, 2021, from <https://www.dataholz.eu/anwendungen/holzbauprojekte/holz-8-wohn-und-buerogebaeude-de.htm>
- Jensen, P.; et al. (2015).** Product configuration in construction. *International Journal of Mass Customisation*, 5(1), 73. <https://doi.org/10.1504/ijmassc.2015.069601>
- Koppelhuber, J.; Bauer, B.; Wall, J.; Heck, D. (2017).** Industrialized Timber Building Systems for an Increased Market Share - A Holistic Approach Targeting Construction Management and Building Economics. *Procedia Engineering*, 171, 333–340. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.341>
- Kremer, P. (2018).** Design for Mass Customised Manufacturing and Assembly (DfMCMA): A New Framework for Mass Timber Construction. *Mass Timber Construction Journal*, 1(August), 5. Retrieved from <https://www.journalmtc.com/index.php/mtcj/article/view/3/2>
- WoodSolutions. Multi-residential CLT in Judenburg Austria (2021).** Retrieved April 16, 2021, from <https://www.woodsolutions.com.au/inspiration-case-study/multi-residential-clt-judenburg-austria>
- Pakkanen, J.; Juuti, T.; Lehtonen, T. (2016).** Brownfield Process: A method for modular product family development aiming for product configuration. *Design Studies*, 45, 210–241. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2016.04.004>
- Shafiee, S.; Piroozfar, P.; Hvam, L.; Farr, E. R. P.; Huang, G. Q.; Pan, W.; Korell, M. (2020a).** Modularisation strategies in the AEC industry: a comparative analysis. *Architectural Engineering and Design Management*. 16 (4) 270-292. <https://doi.org/10.1080/17452007.2020.1735291>
- Smith, R. E. (2016).** Off-Site and Modular Construction Explained. National Institute of Building Sciences, 6. Retrieved from <https://www.wbdg.org/resources/offsiteconstructionexplained.php>
- Smyth, M. (2018).** A Study of the Viability of Cross Laminated Timber for Residential Construction. Stockholm, Sweden.
- Haus der Zukunft. (2004).** Sozialer Wohnbau; Holz-Passivhaus am Mühlweg, 1210 Wien Retrieved April 16, 2021, from <https://nachhaltigwirtschaften.at/de/hdz/projekte/sozialer-wohnbau-holz-passivhaus-am-muehlweg-1210-wien.php>
- Staub-french, S.; Poirier, E. A.; Calderon, F.; Chikhi, I.; Zadeh, P.; Chudasma, D.; Huang, S. (2018).** Building Information Modeling ( BIM ) and Design for Manufacturing and Assembly ( DfMA ) for Mass Timber Construction. *BIM TOPICS Research Lab -UBC*, (November), 83. Retrieved from [bimtopics.civil.ubc.ca](http://bimtopics.civil.ubc.ca)
- ByggfaktaDOCU.se. (2011).** Strandparken Retrieved April 16, 2021, from <https://www.byggfaktadocu.se/kv-tvattstugan-hamngatan-del-av-sundbyberg-2-4/projekt.html>
- Viana, D. D.; Tommelein, I. D.; Formoso, C. T. (2017).** Using modularity to reduce complexity of industrialized building systems for mass customization. *Energies*, 10(10). <https://doi.org/10.3390/en10101622>
- Viklund, E. (2017).** Design approaches in industrialized house building: A creativity perspective (tesis doctoral) (Luleå Univ). Lulea, Suecia.