

**Metodología y gestión
BIM en el desarrollo de
sistemas constructivos en
hormigón.**

El caso Astori y sus nuevas
demandas desde la
arquitectura civil

Lucianne Casasanta García

Casasanta García, Lucianne

Metodología y gestión BIM en el desarrollo de sistemas constructivos en hormigón : el caso Astori y sus nuevas demandas desde la arquitectura civil / Lucianne Casasanta García. - 1a ed ilustrada. - Rosario : A&P. Facultad de Arquitectura, Pleneamiento y Diseño, 2025.

Libro digital, PDF - (Tesis Doctorales ; 16)

Archivo Digital: descarga y online

ISBN 978-987-23713-2-6

1. Arquitectura . 2. Tesis Doctorales. 3. Diseño. I. Título.

CDD 720

**Metodología y gestión BIM en el
desarrollo de sistemas
constructivos en hormigón.**
El caso Astori y sus nuevas demandas
desde la arquitectura civil

Lucianne Casasanta García



DOCTORADO EN ARQUITECTURA
Facultad de Arquitectura, Planeamiento y Diseño
Universidad Nacional de Rosario

Defensa oral y pública: 18 de junio de 2024
Directora: Dra. Arq. Ana María Rigotti
Codirectora: Dra. Arq. Simone Barbosa Villa
Jurado: Dra. Arq. Silvina Cecilia Carrizo, la Dra. Arq. Rita de Cassia Pereira Saramago y el Dr.
Arq. Gustavo Carabajal
Calificación: 9 (distinguido)

RESUMEN

El objetivo central de esta tesis es optimizar los sistemas constructivos prefabricados en hormigón mediante la integración de principios de Building Information Modeling (BIM), ontologías y modelado del conocimiento. Para lograr esto, se aplica la metodología de Design Science Research (DSR), desarrollando el Método de Evaluación para la Arquitectura Prefabricada (MEAP). Este método culmina en la creación del plugin PREAPP (Plugin de Recomendaciones para la Eficiencia en Arquitectura Prefabricada), que tiene como finalidad proporcionar directrices proyectuales formales, funcionales, técnicas y tecnológicas para la arquitectura prefabricada. Se explora la interacción entre diversas estrategias informativas y la gestión de factores que inciden en el entorno edificado, mejorando así la eficiencia en la toma de decisiones y en la planificación de proyectos. Para alimentar el desarrollo de PREAPP, se seleccionaron cinco obras estratégicas realizadas con sistemas constructivos prefabricados en hormigón de la empresa Astori, líder en el mercado argentino y con amplia presencia en América Latina. Dichas obras se distinguieron por su singularidad en diseño, montaje y uso, brindando un conjunto de datos valiosos para el desarrollo del plugin. Los resultados obtenidos a través de este estudio buscan contribuir de manera significativa a la evolución de los sistemas constructivos prefabricados en hormigón en Argentina y otros países de América Latina. Esto se realiza mediante la propuesta de soluciones de diseño y mejoras en materiales y en técnicas constructivas, apuntando hacia el avance de la eficiencia y calidad del entorno edificado.

Palabras clave: Metodología BIM (Building Information Modeling), Modelado de Conocimiento, Construcción Prefabricada en Hormigón, Minería de Datos, Diseño arquitectónico.

ABSTRACT

The central objective of this thesis is to optimize precast concrete construction systems through the integration of Building Information Modeling (BIM) principles, ontologies, and knowledge modeling. To achieve this, the Design Science Research (DSR) methodology is applied, developing the Evaluation Method for Prefabricated Architecture (MEAP). This method culminates in the creation of the PREAPP plugin (Plugin for Recommendations for Efficiency in Prefabricated Architecture), which aims to provide formal, functional, technical, and technological project guidelines for prefabricated architecture. The interaction between various information strategies and the management of factors impacting the built environment is explored, thus enhancing efficiency in decision-making and project planning. To fuel the development of PREAPP, five strategic works were selected, carried out with precast concrete construction systems from the Astori company, a leader in the Argentine market and with a broad presence in Latin America. These works distinguished themselves by their uniqueness in design, assembly, and use, providing a valuable set of data for the plugin's development. The results obtained through this study seek to contribute significantly to the evolution of precast concrete construction systems in Argentina and other Latin American countries. This is achieved by proposing design solutions, improvements in materials and construction techniques, always aiming towards the advancement of efficiency and quality of the built environment.

Keywords: BIM Methodology (Building Information Modeling), Knowledge Modeling, Prefabricated Concrete Construction, Data Mining, Architectural Design.

Índice general

Agradecimientos	9
Abreviaturas utilizadas.....	12
Preámbulo.....	14
Introducción.....	15
Un enfoque innovador para la optimización de sistemas constructivos prefabricados en hormigón	15
Identificación del problema e hipótesis de la investigación	17
Objetivos: hacia la eficiencia y calidad de la edificación	20
Estrategias metodológicas y paramétricas.....	21
Mapa guía para la <i>arquitectura civil 4.0</i>	25
Metodología BIM: el mapa.....	26
Sistemas constructivos prefabricados: las herramientas.....	27
Modelado de conocimiento: la interpretación del mapa	28
Ontologías: el lenguaje del explorador	30
El MEAP: preparación antes de la expedición	30
El plugin PREAPP: la brújula especializada.....	31
Estructura de la tesis	32
Etapas I: el sistema	35
Introducción.....	36
Astori y la revolución prefabricada.....	38
El eje del río de la Plata.....	41
El caso Astori y las nuevas demandas desde la arquitectura civil.....	43
Astori a nivel nacional e internacional.....	47
El Sistema Astori y otros sistemas prefabricados.....	48
Los elementos Astori y su explotación arquitectónica	53
El arte y la ciencia detrás del sistema Astori.....	54
Cerramientos Lisos.....	55
Cerramientos Nervurados.....	57
Entrepisos	59
Estadios - Tribunas.....	61
Sistema Constructivo de Vivienda.....	64
Sistema Mixto	65
Sistema Pi	68
Sistema Ypsilon.....	70
Reflexiones finales	73

Etapa II: el método 75

Introducción 76

Hacia la *arquitectura civil 4.0* 78

La convergencia poética de lo digital y lo concreto 82

BIM: la transformación digital para el desarrollo del MEAP	83
¿Cómo utilizar los datos del modelo BIM?	86
Modelado del conocimiento: forjando la base del MEAP	91
Ontologías: el lenguaje esencial en la elaboración del MEAP	93

La investigación de la ciencia del diseño..... 96

DSR como respuesta metodológica	96
Entre lo visible y lo invisible: la identificación del problema	98
Lo palpable: la creación de soluciones.....	101
Lo medible en enfoque: la evaluación y validación de las soluciones.....	102
Fundamentos del MEAP	103
Proceso de evaluación con el MEAP	105
Validación de soluciones	108
Lo transmisible: la comunicación de los resultados.....	115

Hacia un modelo de evaluación 117

La configuración del MEAP	117
Herramientas de modelado y visualización.....	119
Métricas de evaluación	120
Calidad del hormigón	121
Eficiencia de producción.....	122
Sostenibilidad ambiental	124
Economía y costos	125
Aspectos logísticos.....	126
Flexibilidad de diseño	127
Seguridad	128
Mantenimiento.....	128
Integración con otros materiales	129
Innovación y tecnología	129
Métricas paramétricas	130
Procedimientos de revisión y mejora.....	133

Estudios de caso: aplicación y análisis práctico del MEAP 135

Selección: datos de los estudios de caso	135
Finca José Ignacio (Maldonado – Uruguay).....	136
Costa urbana shopping (Ciudad de la Costa – Uruguay).....	141
Complejo Multipropósito Parque Roca (Buenos Aires – Argentina)	144

Hotel Griffa (Rosario – Argentina)	147
Pabellón Verde (Córdoba – Argentina)	153
Preproceso: criterios de evaluación	156
Tipo de hormigón	157
Tamaño y forma de los elementos prefabricados	159
Métodos de unión	160
Tipo de refuerzo	161
Técnicas de acabado superficial	162
Geometría y disposición de los elementos prefabricados	163
Secuencia de montaje y procedimientos de elevación.....	164
Sistemas de anclaje y fijación.....	166
Métodos de transporte y logística.....	167
Transformación: clasificación de los casos	169
Minería de datos: reglas de asociación y clustering	172
Interpretación y evaluación	175
Validación: la prueba piloto del MEAP	178
Recopilación de datos del modelo.....	179
Sistematización de datos y análisis.....	181
Consideraciones finales	186
Etapas III: el plugin.....	190
Desarrollo del plugin PREAPP	193
Sección 1: definición de variables y subvariables.....	195
Sección 2: generación de soluciones candidatas	196
Sección 3: Evaluación de Criterios.....	197
Sección 4: implementación del algoritmo	202
Sección 5: selección de las mejores opciones de diseño.....	203
Sección 6: validación.....	206
Modo de operación del PREAPP	207
Ingreso de Datos.....	207
Procesamiento Climático	207
Selección de Elementos Prefabricados	208
Simulación y Análisis	209
Optimización Logística.....	209
Informe y Recomendaciones	214
Patentamiento	215
Alcances y recomendaciones futuras	217
Listado de ilustraciones	Erro! Indicador não definido.
Listado de tablas	224
Bibliografía	226

Anexos237

Temperatura	237
Humedad	238
Velocidad del viento	240
Dirección de la fachada	242
Azimut solar	243
Uso	245

Agradecimientos

A mi querida hija Alice, quien llegó al mundo en medio de la realización de esta tesis. Gracias por iluminar cada día con tu sonrisa y por enseñarme lo maravilloso que es ser tu madre. Espero que este trabajo sea una pequeña inspiración para ti, y que siempre sepas que eres mi mayor logro y motivación en la vida.

A Otávio, amor de mi vida, cuyo apoyo y comprensión han sido mi refugio; cada palabra de aliento y cada gesto de amor han sostenido mis días más difíciles, y su amor incondicional ha sido el abrazo que ha calmado mis tempestades internas.

A Valéria y Sérgio, mis padres queridos, la fortaleza y el amor que me han inculcado son la base de todo lo que soy. Cada lección impartida ha formado la esencia de mi ser, y su apoyo incondicional ha sido el ancla de mi vida. A Ana Luíza y Hugo, mis hermanos y confidentes, su amistad y apoyo constante han sido los compañeros silenciosos en cada paso de mi jornada, proporcionándome fuerza e inspiración.

A Ana María Rigotti, mi directora, a quien debo cada página, cada descubrimiento y cada logro de este trabajo. Su conocimiento y experiencia han sido cruciales, brindándome guía y claridad para superar cada obstáculo y a alcanzar los objetivos de esta investigación. Gracias, por su dedicación incansable y por creer en este proyecto tanto como yo.

A Simone Barbosa Villa, mi codirectora, quiero expresar mi profundo agradecimiento. Sus contribuciones y perspectivas únicas han sido vitales para el avance de esta investigación. Su voluntad constante para intercambiar y discutir ideas ha enriquecido y consolidado los argumentos aquí presentados, aportando profundidad y rigor a cada fase del estudio.

A Bernard Kamsu Foguem, su enfoque analítico y su vasto conocimiento han servido como pilares fundamentales para estructurar y dotar de profundidad a esta investigación.

Su orientación precisa y perspicaz ha proporcionado claridad y dirección en cada etapa del proceso investigativo.

Al doctorado de la FAPyD, mis sinceros agradecimientos, destacando especialmente a su director Héctor Floriani y a la coordinadora Elisa Pardo, quienes me impulsaron a alcanzar mi mejor versión durante todo el recorrido del doctorado y, más aún, en su fase conclusiva.

A todo el equipo y personal de la Facultad de Arquitectura, Planeamiento Urbano y Diseño (FAPyD), mi más sincero agradecimiento por acogerme y apoyarme durante todo este trayecto. Su acogida y apoyo proporcionaron las herramientas y el ambiente propicio para crecer y desarrollar mi investigación. Su compromiso con la excelencia y la educación ha sido una inspiración y me ha impulsado a alcanzar mis metas.

A Daniela Cattaneo, cuyas palabras de aliento y apoyo fueron mi primer vínculo con la FAPyD al trasladarme a Rosario. Su acogida y guía durante el proceso de admisión al doctorado han sido fundamentales.

A Pedro Soria, cuya disposición para proporcionar detalles precisos y valiosos sobre el proyecto Hotel Griffa en Rosario ha imprimido una profundidad y singularidad excepcionales a mi trabajo. La generosidad con la que compartió su perspectiva y conocimientos no solo ha enriquecido mi percepción arquitectónica, sino también ha elevado la calidad y la robustez de mi investigación.

A Rodrigo Argañarás, de Astori Argentina, su apertura para proporcionar la documentación sobre el Estadio Multipropósito Parque Roca y el Pabellón Verde ha sido esencial; sus detalles y aclaraciones han proporcionado un marco sólido y detallado para el análisis de estas estructuras y su disposición para compartir su experiencia ha enriquecido enormemente este trabajo.

A José Luis Pertusso, de Astori Uruguay, su voluntad de compartir la documentación y detalles sobre la Finca José Ignacio y el Costa Urbana Shopping han sido vitales; su colaboración y apertura para compartir información han brindado una visión detallada y completa de estas realizaciones arquitectónicas; su conocimiento ha sido un recurso invaluable en este proceso investigativo.

A todo el equipo de Astori, que me acogió con brazos abiertos y compartió conmigo información invaluable que fue crucial para el avance de esta investigación. Su hospitalidad y su disposición para compartir conocimientos han sido fundamentales y han añadido una riqueza significativa a mi trabajo. Les agradezco profundamente por su colaboración y por hacerme sentir bienvenida en cada interacción.

A Ricardo Sargiotti, sus contribuciones y su colaboración han sido esenciales, su apoyo y conocimiento han sido pilares en el desarrollo de este proyecto, su experiencia y consejos han añadido claridad y dirección a este trabajo, contribuyendo de manera significativa a la calidad de este.

A todos los que participaron en mi investigación y a cada uno que ha sido parte de esta jornada académica, les doy las más sinceras gracias. Cada página de este estudio contiene ecos de sus aportaciones y cada línea es un reflejo de su sabiduría y apoyo. Su colaboración ha sido fundamental, y la suma de sus conocimientos y experiencias ha sido crucial para la concreción de este trabajo, aportando claridad, enriqueciendo el contenido y fortaleciendo los fundamentos de este estudio.

Abreviaturas utilizadas

ACV: Análisis de Ciclo de Vida

AIC: Arquitectura, Ingeniería y Construcción

ASHRAE: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

BIM: Building Information Modeling

CAD: Computer-Aided Design

CO2: Dióxido de carbono

DGNB: Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (Sociedad Alemana de Construcción Sostenible)

DSR: Design Science Research

DW: Data Warehouse

GBCe: Green Building Council España

GC: Gestión del Conocimiento

HºAº: Hormigón Armado

HVAC: Heating, Ventilation, and Air Conditioning (Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado)

ISO: International Organization for Standardization (Organización Internacional de Normalización)

LEED: Leadership in Energy and Environmental Design (Liderazgo en Energía y Diseño Ambiental)

MEAP: Método de Explotación Arquitectónica para Prefabricados

MEP: Mechanical, Electrical, and Plumbing (Mecánica, Electricidad y Fontanería)

ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible

PREAPP: Plugin de Recomendaciones para la Eficiencia en Arquitectura Prefabricada

PV: Photovoltaic (Fotovoltaico)

RCP: Reflected Ceiling Plan (Plano de Techo Reflectante)

RIR: Room Impulse Response (Respuesta Impulsiva de un Recinto)

SRI: Solar Reflectance Index (Índice de Reflectancia Solar)

UNE: Une Norma Española (Norma Española)

Preámbulo

La estructura de esta tesis se ha en tres partes distintas, una decisión estratégica que responde a la necesidad de abordar la profundidad del tema de los sistemas constructivos prefabricados en hormigón, especialmente los sistemas Astori, de una manera coherente y accesible.

La primera establece las bases, sumergiéndonos en una revisión de la literatura existente. Esta etapa es fundamental, ya que construye el marco teórico sobre el cual se sostiene esta investigación, iluminando los desafíos y oportunidades de los sistemas prefabricados en hormigón. Es aquí donde el sistema Astori se presenta y se sitúa en el contexto más amplio de los métodos constructivos emergentes.

Dada la ausencia de metodologías de evaluación específicas en este campo, la segunda parte de la tesis introduce y desarrolla el MEAP (Método de Evaluación de la Arquitectura Prefabricada). Esta sección representa el corazón del trabajo, donde la teoría es puesta a prueba. La validación de este método se realiza a través del análisis de casos de estudio que implementan el sistema Astori, seleccionados por su relevancia y particularidades distintivas.

Sin embargo, se reconoce que la teoría, aunque sea sólida, necesita un puente hacia la aplicación práctica. Esto nos lleva a la tercera parte de la tesis, que no solo responde al “qué” y al “por qué”, sino también al “cómo”. En esta fase final, se presenta el plugin PREAPP, desarrollado para traducir la metodología teórica en un conjunto de herramientas prácticas y accesibles para profesionales y otros actores en el campo de la construcción civil.

Introducción

Un enfoque innovador para la optimización de sistemas constructivos prefabricados en hormigón

En el actual contexto de la arquitectura y construcción, los sistemas constructivos prefabricados en hormigón emergen como innovaciones cruciales dentro del sector de Arquitectura, Ingeniería y Construcción (AIC). Estos sistemas representan un avance sustancial en la optimización de procesos constructivos, asegurando altos estándares de calidad y sostenibilidad, al tiempo que reducen el tiempo y los residuos generados¹.

La prefabricación en hormigón ha revelado su adaptabilidad y diversidad en numerosos proyectos, posibilitando su empleo en una vasta gama de aplicaciones, desde viviendas unifamiliares hasta infraestructuras de gran envergadura². No obstante, hay aspectos dentro de la arquitectura civil – disciplina enfocada en el diseño y construcción de edificaciones destinadas al uso y ocupación humanos – que requieren mayor exploración y optimización, subrayando así la necesidad de formular estrategias efectivas y pioneras en este campo.

Esta investigación explora los desafíos asociados con la construcción prefabricada en hormigón, proponiendo estrategias para su integración efectiva a la construcción civil urbana y para maximizar sus beneficios. Se pone un énfasis especial en la metodología Building Information Modeling (BIM) y en el modelado de conocimiento especializado, proponiendo un enfoque que utiliza datos de BIM para generar conocimientos

¹ (Gibb A. G., 2001). *Standardization and pre-assembly - distinguishing myth from reality using case study research*. Construction Management & Economics, 19(3), 307–315.

² (Smith, 2014). *Prefabricated Systems: Principles of Construction*. Taylor & Francis.

importantes e identificar oportunidades de mejora y optimización en el sector. La metodología BIM es un proceso integral para la creación y gestión de información de edificaciones, utilizando tecnologías de modelado tridimensional y de bases de datos para facilitar una construcción más precisa y eficiente. El modelado de conocimiento, por su parte, implica la estructuración y el análisis de información y conocimientos específicos, optimizando la toma de decisiones y la resolución de problemas.

Este estudio se fundamenta en los principios de Design Science Research (DSR), un enfoque de investigación que aspira a crear soluciones concretas e innovadoras a través del desarrollo de objetos o herramientas que puedan ser evaluados por su utilidad y su capacidad para resolver problemas específicos. El objeto de innovación presentado en esta tesis es el MEAP (Método para Explotación Arquitectónica de Prefabricados), elaborado en base a estudios de caso de la empresa argentina Astori, líder en sistemas prefabricados de hormigón en Latinoamérica. Este método utiliza una combinación de herramientas y enfoques incluyendo la metodología BIM, ontologías y modelado de conocimiento, para proporcionar una evaluación detallada y multifacética de estos sistemas de construcción. Asimismo, se introduce el PREAPP (Plugin de Recomendaciones para la Eficiencia en Arquitectura Prefabricada), una herramienta diseñada para perfeccionar la toma de decisiones en el ámbito de la construcción prefabricada.

La finalidad primordial de este estudio es incentivar el desarrollo constante en el sector de la AIC, fomentando una sinergia entre el diseño arquitectónico y la tecnología. Bajo esta perspectiva, se aspira a estimular la creación de soluciones constructivas que puedan abordar de manera adecuada los desafíos y requerimientos del siglo XXI. Los frutos de esta investigación no solo buscan enriquecer el acervo teórico sobre la arquitectura prefabricada, sino establecer un fundamento sólido para futuras innovaciones en este

sector, tanto a nivel nacional en Argentina como en el ámbito más amplio de Latinoamérica.

Identificación del problema e hipótesis de la investigación

Los sistemas prefabricados de hormigón emergieron como una solución prometedora en la industria de la construcción. Según lo destacado por Lu et al. (2019)³, dichos sistemas proporcionan beneficios significativos, como la optimización de la producción y el montaje, traduciéndose en una reducción substancial de tiempo y recursos en comparación con los métodos constructivos tradicionales. Estos autores también resaltan la minimización del desperdicio de materiales y el fortalecimiento de la seguridad en el trabajo, derivado del desplazamiento de gran parte del proceso a espacios controlados. Sin embargo, como se mencionó previamente, la implementación de estos sistemas en el ámbito de la arquitectura civil no está exenta de desafíos.

Un reto importante radica en la necesidad de adaptar y personalizar los componentes prefabricados a las especificidades y requisitos únicos de cada proyecto. Este proceso de adaptación debe garantizar un ajuste preciso al diseño arquitectónico y a las condiciones particulares del sitio de construcción. Además, la integración de estos elementos prefabricados con otros componentes constructivos es un factor crítico para lograr una construcción coherente y funcional. Esto implica que se debe fomentar una colaboración efectiva entre todos los actores involucrados en el proceso de construcción: arquitectos, ingenieros, constructores e industria de partes. Esta colaboración resulta esencial para resolver los problemas prácticos que puedan surgir durante el proceso de implementación de estos sistemas y para aprovechar al máximo sus potencialidades.

³ (Lu, Chen, Xue, & Pan, 2019). *Searching for an optimal level of prefabrication in construction: An analytical framework*. Journal of Cleaner Production.

La génesis de esta tesis surge en respuesta a los retos encontrados durante el desarrollo del proyecto de investigación “MORA [I] - Elaboración, Construcción y Verificación de Unidad Habitacional de Bajo Costo bajo la Óptica de la Flexibilidad”⁴. La singularidad de este proyecto es la aplicación de sistemas constructivos prefabricados, por sus ventajas en eficiencia, costos y tiempos de construcción. Su principio fundamental radica en un concepto amplio de flexibilidad habitacional, que incluye tanto la adaptabilidad espacial y funcional de los componentes de la vivienda como la sostenibilidad de los materiales y sistemas empleados. Este concepto no solo ha implicado la capacidad para modificar el espacio según diferentes funciones o necesidades, sino también la posibilidad de optar por materiales y técnicas constructivas que sean sostenibles y duraderas, capaces de resistir variaciones y mantenerse a lo largo del tiempo.

Esta experiencia práctica, como becaria de investigación⁵ del grupo MORA entre 2011 y 2012, proporcionó una perspectiva invaluable sobre las oportunidades y desafíos asociados con la incorporación de estos sistemas a la arquitectura civil, ofreciendo un conocimiento distintivo de las necesidades y potencialidades para su optimización. La investigación suscitó una serie de preguntas que condujeron al desarrollo de esta tesis: ¿Es factible optimizar aquellos elementos prefabricados diseñados inicialmente para infraestructuras industriales, para aplicarlos en el ámbito arquitectónico? Al evaluar un sistema constructivo, ¿qué observaciones pueden plantearse con relación a su eficiencia, sus limitaciones y áreas de perfeccionamiento? ¿Es posible diseñar estrategias para su optimización y mejora?

⁴ El proyecto MORA [I] está diseñado para familias con ingresos que oscilan entre 3 y 5 salarios mínimos. Así, aspira a ofrecer soluciones habitacionales asequibles que no sólo cumplan con las necesidades básicas, sino que proporcionen una alta calidad de vida y se adapten a las circunstancias cambiantes de sus habitantes. Para una descripción más detallada del proyecto, se puede visitar el siguiente enlace: <https://morahabitacao.com/pesquisas-em-andamento-2/mora1>.

⁵ La beca fue financiada por la FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais) en el marco del Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica – PIBIC/FAPEMIG/UFU: Edital No 012/2010. Este programa convocó a proyectos de investigación para otorgar becas desde marzo de 2011 hasta febrero de 2012.

Frente a estas interrogantes, se plantearon las siguientes hipótesis que constituyeron los pilares de esta investigación: (i) Es factible optimizar elementos prefabricados en hormigón para su aplicación en el ámbito arquitectónico. Se espera que existan posibilidades de adaptar y personalizar estos elementos para satisfacer los requisitos específicos de proyectos arquitectónicos, aprovechando las ventajas de la prefabricación para lograr una mayor eficiencia y rapidez en la construcción; (ii) Al analizar en profundidad un sistema, se descubrirán consideraciones pertinentes a su eficacia, restricciones y oportunidades de mejora. Se espera descubrir beneficios inherentes, como la aceleración del proceso constructivo y la disminución de costos, así como áreas que requieran refinamiento, tales como la superación de desafíos logísticos y la aseguración de la calidad y longevidad de los componentes prefabricados.; (iii) Existen estrategias multidisciplinarias, sobre todo en las ciencias de la información, que podrían proponerse para optimizar y mejorar estos sistemas prefabricados. Se pueden explorar nuevas metodologías de análisis para superar los obstáculos inherentes a su implementación en la arquitectura civil.

Se concibió la idea de que el empleo del BIM, en colaboración con el modelado de conocimiento, podría propiciar una colaboración efectiva entre los diferentes actores involucrados en el proceso constructivo. El potencial de estas herramientas para facilitar la comunicación y el intercambio de información ofrece un marco de entendimiento y promueve una mayor sinergia y cooperación.

Se ha reconocido la metodología BIM como un catalizador potencial, que posee la capacidad para transformar y optimizar los sistemas prefabricados en hormigón. BIM, como un modelo integral y multidimensional, no solo encapsula la representación del aspecto físico de una edificación, sino que caracteriza de manera detallada su comportamiento funcional, las interrelaciones entre sus distintos componentes y sus

propiedades inherentes⁶. Esta representación meticulosa puede permitir una personalización y adaptación más efectiva de los componentes prefabricados, facilitando así su integración en la arquitectura civil.

Paralelamente, se analizó el papel transformativo que las ontologías y el modelado de conocimiento podrían desempeñar para vencer los obstáculos presentes al implementar estos sistemas en la arquitectura civil. El término “ontologías” proviene de la filosofía y trata del estudio del ser. Históricamente, se ha denominado ontología a sistemas de categorías orientados a definir propiedades, relaciones y estructuras fundamentales existentes en el mundo. Este concepto filosófico fue, más tarde, incorporado y adaptado en el ámbito de la informática. En el marco de esta tesis, el uso de ontologías se relaciona con la ciencia de la información, con un enfoque orientado a la construcción de estructuras lógicas que organicen y describan el conocimiento acerca de los sistemas constructivos prefabricados en hormigón. En este escenario, las ontologías funcionan como herramientas para establecer un vocabulario común y una estructura conceptual sólida que facilite la representación y comprensión exacta de los elementos y conceptos vinculados al objeto de estudio⁷.

Objetivos: hacia la eficiencia y calidad de la edificación

El objetivo principal de la tesis ha sido optimizar los sistemas prefabricados en hormigón, en particular el sistema Astori, a través del método MEAP y el desarrollo del plugin PREAPP. Este plugin, como herramienta práctica derivada del MEAP, propone recomendaciones de diseño sustentadas en análisis formales, funcionales, técnicos y

⁶ (Succar, 2009). Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders. *Automation in Construction*, 18(3), 357-375.

⁷ (Studer, Benjamins, & Fensel, 1998) *Knowledge engineering: principles and methods*. *Data & Knowledge Engineering*, 25(1-2), 161-197.

tecnológicos, buscando realzar la eficiencia en la integración de estos sistemas estructurales a la arquitectura civil. Se pretendió así fomentar la adopción de estos sistemas en Argentina y otros países latinoamericanos, subrayando su potencial para innovar y mejorar la eficiencia en el ámbito constructivo.

Para alcanzarlo, se establecieron los siguientes objetivos específicos: (i) Profundizar en la comprensión de los fundamentos y usos del BIM y evaluar su implementación en el contexto de la arquitectura prefabricada en hormigón como contribución a su perfeccionamiento; (ii) Examinar detalladamente el sistema Astori para identificar áreas susceptibles de mejoras, explorando desafíos y oportunidades en su implementación práctica; (iii) Investigar de forma empírica, mediante el estudio de proyectos realizados con estructuras de la empresa Astori, las necesidades, desafíos y oportunidades presentes, alimentando tanto el método MEAP como el plugin PREAPP. (iv) Ejecutar una prueba piloto del método MEAP para validar y refinar las directrices de diseño, montaje y uso propuestas, analizando los resultados para realizar ajustes necesarios y perfeccionar las recomendaciones metodológicas presentadas.

Estrategias metodológicas y paramétricas

Las estrategias metodológicas se fundamentan en la metodología DSR, un enfoque que integra la teoría y la práctica mediante un proceso iterativo de diseño, desarrollo y evaluación. La DSR se distingue por su énfasis en crear artefactos tangibles o intangibles surgidos de la investigación, sean estos herramientas, sistemas, métodos o modelos. Desde los aportes iniciales de Simon (1996)⁸ y de March y Smith (1995)⁹ sobre la conceptualización del diseño como una ciencia, una diversidad de investigadores ha

⁸ (Simon, 1996). *The Sciences of the Artificial* (3rd ed.). MIT Press.

⁹ (March & Smith, 1995). *Design and natural science research on information technology*. Decision Support Systems, 15(4), 251-266.

proporcionado estrategias, prácticas y procesos valiosos para la DSR. Uno de los trabajos más destacados y citados en esta área es el de Hevner et al. (2004)¹⁰, sin embargo, investigadores como Takeda et al. (1990)¹¹, Walls et al. (1992)¹², y Carlsson (2003)¹³ también han proporcionado orientaciones significativas sobre cómo proceder en el desarrollo de artefactos en DSR.

El MEAP cumple con esta condición de artefacto, ya que fue conceptualizado, desarrollado y validado en el marco de esta tesis. Su creación proporciona un marco estructurado para esta y futuras investigaciones, permitiendo la obtención de resultados pragmáticos y aplicables, como ha sido la creación del plugin PREAPP, diseñado para optimizar y enriquecer la toma de decisiones en el terreno de la arquitectura prefabricada.

La génesis del MEAP comenzó con la identificación del problema, a través de un análisis meticuloso de las problemáticas y necesidades prevalentes en la arquitectura prefabricada en general y en su aplicación a la arquitectura civil en particular. Se buscó obtener una comprensión profunda de los desafíos particulares del sector, como sustento de la creación de soluciones, conceptos e ideas primarias que se pudieron transformar en soluciones tangibles y operativas. Este proceso dio lugar a los prototipos iniciales del MEAP a través de pruebas iterativas, para refinar progresivamente el artefacto hasta alcanzar los niveles de funcionalidad y fiabilidad aspirados.

Durante la fase de evaluación, se realizó un análisis detallado del rendimiento y de la aplicabilidad del artefacto, identificando áreas críticas y sectores susceptibles a mejoras y refinamientos. Esto aseguró que cada componente del MEAP satisficiera los criterios de

¹⁰ (Hevner, March, Park, & Ram, 2004). *Design science in information systems research*. MIS Quarterly, 28(1), 75-105.

¹¹ (Takeda, Veerkamp, Tomiyama, & Yoshikawa, 1990). *Modeling design processes*. AI Magazine, 11, 4, 37-48.

¹² (Walls, Widmeyer, & El Sawy, 2004). *Assessing information system design theory in perspective: how useful was our 1992 initial rendition*. Journal of Information Technology Theory and Application, 6, 3, 43-58

¹³ (Carlsson, 2006). *Towards an Information Systems Design Research Framework: A Critical Realist Perspective*. In Proceedings of the 1st International Conference on Design Science Research in Information Systems and Technology (DESRIST), (Claremont, California).

calidad y eficiencia previamente definidos. Subsecuentemente, se buscó validar la funcionalidad y la eficacia del MEAP en contextos prácticos y reales, implementando ajustes adicionales, y procurando que el método respondiera adecuadamente a las demandas de la arquitectura prefabricada que recurra a sistemas estructurales prefabricados.

Concluyendo el proceso, la etapa de comunicación se centró en difundir los descubrimientos y logros conseguidos con el MEAP entre la comunidad académica y profesional para fomentar el diálogo y la cooperación a través de la participación en encuentros académicos, estadías de investigación y publicaciones en revistas especializadas¹⁴. Se realizaron, además, análisis in situ y entrevistas¹⁵ a expertos en el campo, incluyendo ingenieros, arquitectos y profesionales de la construcción con experiencia directa en el sistema Astori.

Para profundizar en el entendimiento del desarrollo del MEAP, resulta esencial analizar las estrategias paramétricas implementadas, las cuales consideramos fundamentales para explorar y optimizar los sistemas prefabricados en hormigón. Estas herramientas no solo permiten un análisis detallado, sino que aseguran adaptabilidad a los parámetros de diseño de la arquitectura civil, que son notablemente más complejos que los previstos inicialmente para la construcción industrial.

Las estrategias paramétricas han evolucionado significativamente a lo largo de estos últimos años, desempeñando un papel crucial en la transformación del diseño

¹⁴ García, L. C., & Kamsu-Foguem, B. (2019). BIM-oriented data mining for thermal performance of prefabricated buildings. *Ecological Informatics*, 51, 61-72. ELSEVIER SCIENCE BV.

García, L. C., & Villa, S. B. (2022). BIM and Knowledge Modelling as a lean tool for the improvement of prefabricated building systems: User-driven innovation in the construction process. *Journal Architecture, Engineering and Design Management* in "Lean Design and Digitalisation: towards construction 5.0". Sydney.

¹⁵ Es importante destacar que, dado al carácter de este proyecto de investigación, todas las etapas del proceso se llevaron a cabo con estricto cumplimiento de los principios éticos y obteniendo las autorizaciones necesarias para acceder a los sitios y recopilar datos. Además, en el contexto de la pandemia del COVID-19, todas las visitas también se realizaron siguiendo los protocolos de recomendación establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS).

arquitectónico y la construcción. Inicialmente exploradas y articuladas por autores como Woodbury, (2010)¹⁶, que no solo estableció las bases conceptuales y metodológicas del diseño paramétrico, sino que proporcionó un detallado entendimiento de su potencial en la concepción de formas arquitectónicas innovadoras y adaptativas. Posteriormente, autores como Achim Menges (2012)¹⁷ han expandido el alcance y la profundidad de las estrategias paramétricas, explorando la integración de las resoluciones materiales y los procesos de fabricación. Su exploración de la sinergia entre material, forma y diseño contribuyeron a una comprensión más profunda de sus posibilidades.

El Diseño Basado en Reglas resultó fundamental para avanzar en la aplicación de estrategias paramétricas en el marco del sistema Astori. Permitió formular soluciones coherentes y adaptativas a través de normas y principios originados en las propiedades inherentes del sistema y aportar un entorno ordenado para plantear soluciones en este campo específico.

La Optimización Multiobjetivo ha sido la estrategia para explorar un espectro extenso de posibilidades con el fin de conciliar múltiples objetivos, consiguiendo soluciones que balanceen de manera eficaz las diversas demandas y expectativas asociadas al proyecto. Adicionalmente, la Adaptabilidad Paramétrica fue el recurso para posibilitar la modificación de los diseños y adecuarse a diferentes condiciones y contextos, brindando la flexibilidad necesaria a la formulación de soluciones personalizadas y específicas. Esto ha permitido prever una respuesta ágil ante modificaciones en los requisitos y circunstancias del proyecto.

La Simulación y el Análisis fueron los instrumentos para evaluar de manera pormenorizada los distintos aspectos del diseño. A través de la implementación de métodos de simulación

¹⁶ (Woodbury, 2010). *Elements of Parametric Design*.

¹⁷ (Menges, 2012). *Material Computation: Higher Integration in Morphogenetic Design*.

avanzados, fue posible adquirir percepciones detalladas para orientar y estructurar el proceso de diseño, facilitando ciertos ajustes y mejoras fundadas en datos sólidos.

En conjunto, estas estrategias metodológicas y paramétricas conformaron un enfoque integral en nuestro intento de optimizar los sistemas prefabricados en hormigón. La DSR provee una base adecuada para guiar la implementación de soluciones prácticas, y las herramientas paramétricas agregan esa dimensión técnica y multidisciplinaria buscada.

Mapa guía para la *arquitectura civil 4.0*

En este apartado, se invita al lector a un viaje metafórico a través de los dominios de la arquitectura prefabricada, en una suerte de expedición en busca de la “*arquitectura civil 4.0*”¹⁸. Se introduce este término para describir un nuevo paradigma en el campo de la arquitectura y la construcción, capaz de integrar las tecnologías informáticas emergentes con los métodos de construcción prefabricada en hormigón. Cada concepto se presenta como una herramienta indispensable para descifrar y entender el campo investigado; no solo simbolizan términos pertinentes, sino que ilustran el actual estado de investigación en sus respectivos campos, estableciendo así el fundamento teórico de este estudio. La metodología BIM, los sistemas constructivos prefabricados, el modelado de conocimiento, las ontologías, el MEAP y el plugin PREAPP desempeñan funciones cruciales, estructurando un marco coherente que ha guiado nuestros esfuerzos en búsqueda de la optimización y la excelencia en este sector.

Así como un explorador inicia su camino provisto de herramientas imprescindibles y un mapa detallado, este estudio se sumerge en el proceso de optimización de sistemas constructivos prefabricados en hormigón, orientado por conceptos claves.

¹⁸ La explicación completa y detallada de este concepto se abordará en la Etapa II de esta tesis.

Metodología BIM: el mapa

La metodología BIM sirve como el mapa del explorador; proporciona una visión estructurada y precisa del territorio, identifica obstáculos potenciales, destaca las rutas óptimas para alcanzar los objetivos y resulta un elemento fundamental para identificar las estrategias más efectivas.

La metodología BIM propone un enfoque integral para la gestión de proyectos de construcción mediante la creación y utilización de modelos tridimensionales detallados e informativos. Eastman et al. (2011)¹⁹ la destacan como un marco de trabajo crucial para mejorar la eficacia y eficiencia en la construcción. Permite anticipar y visualizar problemas, simular la construcción y gestionar los costos, actuando como soporte esencial para tomar decisiones durante las fases de diseño y construcción.

Gracias a su enfoque integrado, posibilita, además, la coordinación entre las diversas disciplinas involucradas en un proyecto, permitiendo modelar diferentes aspectos de un edificio (estructurales, energéticos, de instalaciones, etc.) dentro de un único modelo. Para Azhar (2011)²⁰, mejora la colaboración en tanto posibilita el intercambio de información de manera eficiente y coherente, minimizando así las posibilidades de errores y malentendidos.

En el contexto de la arquitectura prefabricada, la metodología BIM adquiere un valor adicional. Observaciones de Sacks et al. (2010)²¹ subrayan cómo BIM facilita una flexibilidad significativa para personalizar los diseños y adaptar los componentes a las especificidades de cada proyecto. Permite modelar y visualizar virtualmente los elementos

¹⁹ (Eastman C. , Teicholz, Sacks, & Liston, 2011) *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers, and contractors*. John Wiley & Sons.

²⁰ (Azhar, Khalfan, Maqsood, & Ahmed, 2012) *Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry*. *Leadership and Management in Engineering*, 11(3), 241-252.

²¹ (Sacks, Barak, Eastman, & Lee, 2010). *Requirements for developing and implementing prefabrication*. *Journal of architectural engineering*. 67-73.

del edificio en un entorno 3D, mejorando así la eficiencia en la producción y la construcción. Smith (2014)²² sugiere que BIM contribuye a una visión completa de todos los aspectos, involucrando aspectos técnicos y formales para una planificación y seguimiento precisos del progreso del proyecto.

Sistemas constructivos prefabricados: las herramientas

Los sistemas constructivos prefabricados son las herramientas del explorador, sus recursos fundamentales. Bien empleados, pueden transformarse en valiosos activos para una construcción eficaz y eficiente. Al igual que un explorador confía en sus herramientas, se confía que la comprensión profunda de estos sistemas permitirá alcanzar los objetivos de esta tesis.

Los sistemas constructivos prefabricados han sido revolucionarios para la arquitectura civil al ofrecer una alternativa más eficiente, rápida y sostenible a los métodos tradicionales de construcción. Gibb (2001)²³ asocia su importancia a la posibilidad de fabricar los componentes estructurales en un entorno controlado. Samarasinghe et al. (2015)²⁴ destacan su precisión, la posibilidad de poder aplicar en ellos controles de calidad y eficiencia, y de reducir de los residuos y los impactos ambientales.

Esta tesis se centra en el “sistema Astori”, que fue implementado en Argentina a finales de los años cincuenta. Más que como sistema, lo considera como una familia de técnicas y soluciones, dado que sus elementos y componentes pueden variar dependiendo de las necesidades y especificaciones del proyecto en particular. A menudo conocido como “tipo Astori”, ha ganado reconocimiento no sólo porque fue el que introdujo este tipo de

²² (Smith, 2014). *Fundamentals of building information modeling*. John Wiley & Sons.

²³ (Gibb A. G., 2001). *Standardization and pre-assembly—distinguishing myth from reality using case study research*. Construction Management & Economics, 19(3), 307-315.

²⁴ (Samarasinghe, Mendis, Ngo, & Fernando, 2015) *BIM Software Framework for Prefabricated Construction: Case Study Demonstrating BIM Implementation on a Modular House*.

construcción en Argentina, sino también por su constante innovación e incorporación de nuevas soluciones y productos.

Sargiotti (2013)²⁵ abordó de forma efectiva los beneficios operativos y la flexibilidad de este sistema; sin embargo existe un vacío evidente en la profundización de su estudio con el auxilio de herramientas informáticas que enriquezcan y mejoren aún más su eficacia y adaptabilidad. Impulsando el desarrollo del sistema Astori y su aplicabilidad en el sector de la construcción prefabricada. Este aspecto subraya la necesidad de estudios futuros enfocados en la intersección entre el sistema prefabricado en hormigón y diferentes campos del conocimiento para potenciar sus capacidades y expandir sus horizontes de aplicación.

Se subraya que el Sistema Astori, objeto central de esta tesis, será examinado de manera detallada para explorar sus potencialidades y limitaciones. La investigación de sus características y el análisis crítico de su aplicabilidad y eficiencia nos permitirá descubrir nuevos caminos para optimizar y enriquecer su implementación, marcando así nuevas pautas para futuras investigaciones en el sector de construcciones prefabricadas.

Modelado de conocimiento: la interpretación del mapa

El modelado de conocimiento actúa como un decodificador del mapa de un explorador, siendo fundamental para procesar y comprender el conocimiento vinculado a los sistemas prefabricados. Esta técnica proporciona las destrezas esenciales para interpretar y manejar la información y los datos, facilitando su uso de manera eficaz. También permite la interoperabilidad de datos, en un proceso que incluye la captura, la representación, y el uso

²⁵ (Sargiotti, 2013). *Sistemas premoldeados en hormigón. El caso Astori. Córdoba (1959-1982)*, en: Actas de las Segundas Jornadas de la Arquitectura y la Ciudad. Buenos Aires: Universidad Torcuato Di Tella, 2013: 16-23.

de datos y conocimientos en un área específica para formular estructuras de datos versátiles y adaptables y facilitar su integración, análisis, y utilización eficiente, habilitando una colaboración efectiva entre diferentes sistemas y aplicaciones y promoviendo la interoperabilidad de datos. Gruber (1993)²⁶ resalta su importancia en el proceso de toma de decisiones y en la facilitación del aprendizaje dentro de las organizaciones.

Mediante el modelado de conocimiento, se pueden identificar los conceptos clave de un campo específico, así como las relaciones y normativas que lo rigen, permitiendo orientar las acciones de manera fundamentada. En el contexto de la arquitectura prefabricada, puede ayudar a la comprensión y gestión de los sistemas y a la optimización de los procesos de diseño y construcción. Rezgui et al. (2011)²⁷ han demostrado como mejorar la gestión de información y los conocimientos en la construcción, fomentando mayor colaboración, y reducción de errores y retrasos. Miettinen y Paavola (2014)²⁸ destacaron que, con el apoyo de herramientas de tecnología de la información – como el BIM – este modelado conocimiento puede contribuir a la automatización de tareas, a la detección y resolución de conflictos en las primeras etapas del proyecto y a la mejora de la calidad del diseño.

No existen, sin embargo, trabajos sobre su posible aporte en el sector de la construcción prefabricada, lo que subraya la necesidad de investigaciones que aborden los desafíos y posibilidades del modelado de conocimiento y en su posible aplicación en la arquitectura civil.

²⁶ (Gruber, 1993) *A translation approach to portable ontology specifications*. Knowledge Acquisition, 5(2), 199-220.

²⁷ (Rezgui, Boddy, Wetherill, & Cooper, 2011) *Past, present, and future of information and knowledge sharing in the construction industry: Towards semantic service-based e-construction?* Computer-Aided Design, 43(5), 502-515.

²⁸ (Miettinen & Paavola, 2014). *Beyond the BIM utopia: Approaches to the development and implementation of building information modeling*. Automation in Construction, 43, 84-91.

Ontologías: el lenguaje del explorador

En esta expedición hacia la *arquitectura civil 4.0*, las ontologías son lenguaje del explorador. De la misma forma que un explorador necesita de un lenguaje común capaz de descubrir y describir su entorno y comunicarse, las ontologías permiten describir, comprender, capturar y comunicar con precisión las complejidades de los sistemas prefabricados, estableciendo un lenguaje para profundizar la comprensión y la colaboración.

Las ontologías formalizan los conceptos y sus relaciones dentro de un dominio específico. Según Studer, Benjamins, y Fensel (1998)²⁹, proporcionan una perspectiva unificada y consensuada de un área de investigación, y resultan elementales para la interoperabilidad de los datos y la integración de la información, una perspectiva que sugiere la conveniencia de explorar como pueden ser adaptadas y aplicadas a la arquitectura civil. Algo que de algún modo sugieren Pauwels y Terkaj (2016)³⁰ al señalar como su uso promueve una integración más cohesiva de información, originaria de diversas fuentes y formatos, fomentando una colaboración efectiva entre los participantes de un proyecto.

El MEAP: preparación antes de la expedición

El MEAP actúa como el entrenamiento preliminar que necesita un explorador que se prepara para una expedición. Este método permite simular y anticipar los obstáculos que se presentarán en el estudio, otorgando una comprensión profunda y las habilidades prácticas para abordar la búsqueda de optimización en la arquitectura civil.

²⁹ (Studer, Benjamins, & Fensel, 1998). *Knowledge engineering: Principles and methods*. Data & Knowledge Engineering, 25(1-2), 161-197.

³⁰ (Pauwels & Terkaj, 2016). *EXPRESS to OWL for construction industry: Towards a recommendable and usable ifcOWL ontology*. Automation in Construction, 63, 100-133.

El MEAP se utiliza para evaluar sistemas constructivos prefabricados de hormigón. Para su formulación, se seleccionaron cinco proyectos de destaque de la empresa Astori, cada uno distinguido por su singularidad en diseño, montaje y uso. La información obtenida enriqueció el método de evaluación y potencializó su capacidad para generar recomendaciones precisas y adecuadas al contexto.

Fue desarrollado para proporcionar una visión integral y comprensiva del sistema, permitiendo un análisis multifacético que incluye aspectos económicos, estructurales, estéticos, de desempeño y sostenibilidad. A través del análisis de los datos empíricos de los casos, el MEAP establece un marco metodológico que permite para valorar las fortalezas y las áreas de mejora de dichos sistemas en escenarios reales de construcción.

El plugin PREAPP: la brújula especializada

Este plugin emerge como una brújula especializada para la arquitectura prefabricada, y permitiría servir como orientación y guía en este campo. Su nombre, PREAPP, es un acrónimo de “Plugin de Recomendaciones para la Eficiencia en Arquitectura Prefabricada” y, además, el término “PRE APP” en inglés sugiere la idea de una “aplicación previa”. Esta interpretación refuerza la concepción del plugin como una guía anticipada en los procesos de diseño y planificación, estableciendo directrices y mejorando la toma de decisiones desde las etapas iniciales del diseño de proyectos con sistemas constructivos prefabricados de hormigón. Fue ideado para ser un referente en el diseño con estos sistemas, proporcionando directrices formales, funcionales, técnicas y tecnológicas para optimizar la toma de decisiones en distintas fases del proyecto. Puede convertirse en un recurso para los profesionales del sector, delineando un camino claro y efectivo hacia la mejora de la eficiencia y calidad. Más allá de ser solo un software, PREAPP se propone como un instrumento estratégico para la planificación y ejecución de proyectos, capaz de gestionar

y analizar factores críticos en el entorno edificado, contribuyendo a la toma de decisiones y la planificación de proyectos más eficientes.

Estructura de la tesis

Esta tesis se ha desarrollado con un enfoque sistemático que ha guiado la división en tres etapas para garantizar la profundidad y la pertinencia de los resultados. Cada etapa fue diseñada con objetivos propios en un esfuerzo por explorar, desarrollar y aplicar herramientas que establezcan un sólido fundamento conceptual y que generen soluciones concretas y pragmáticas para los desafíos que caracterizan el uso de sistemas prefabricados en la arquitectura civil.

La primera etapa se centró en el estado actual de los estudios sobre los sistemas prefabricados en hormigón en general y el sistema Astori en particular. Permitió delinear un panorama de los desafíos, ventajas y áreas potenciales de mejora en diversos contextos constructivos. También permitió comprender mejor las necesidades y oportunidades de la prefabricación en hormigón, sentando las bases para la siguiente etapa.

En la segunda fase, se procedió al desarrollo del MEAP, un método multidisciplinario que aprovecha la sinergia entre el modelaje de conocimiento, las ontologías y la metodología BIM, desde y en relación con el análisis de casos de estudio. Se eligieron cinco estudios de caso que fueron los que aportaron la oportunidad de construir los datos empíricos y sobre todo de superar un enfoque reductoramente técnico, incorporando las demandas y aportes propios de la buena forma y las búsquedas funcionales, estéticas y representativas propias de la arquitectura civil. Estas obras, notables por su singularidad formal y valores arquitectónicos, abarcan diversas características y escalas y han sido publicadas y comentadas por expertos profesionales.

Nuestra intención fue desvelar los desafíos a los que se sometieron sus autores para adaptar un sistema ideado para la construcción de naves industriales a las demandas de confort y singularidad formal que reclama la arquitectura civil.

Al revisar la literatura especializada, identificamos estos cinco casos prominentes que, además, permitían examinar diversos programas y escalas, los intereses y enfoques estilísticos de distintos diseñadores, así como un área de aplicación que refleja las particularidades climáticas y la situación actual de la industria de la construcción en el Cono Sur³¹. Se trata de: (i) Estadio Multipropósito Parque Roca - Buenos Aires, Argentina; (ii) Hotel Griffa - Rosario, Argentina; (iii) Pabellón Verde, Complejo Ferial Córdoba - Córdoba, Argentina; (iv) Finca José Ignacio - Maldonado, Uruguay; (v) Costa Urbana Shopping - Ciudad de la Costa, Uruguay.

Cada uno de estos proyectos fue sometido a un análisis minucioso, generando un conjunto de datos empíricos que sirvieron de base para la elaboración del MEAP. Este análisis permitió entender mejor los esfuerzos necesarios para integrar el sistema Astori en diversos contextos de construcción. Al explorar estas aplicaciones específicas, se pudieron identificar patrones recurrentes, desafíos inherentes al esfuerzo de adaptación, ventajas del sistema y oportunidades para su optimización. Se consideraron aspectos de diseño, de montaje y de uso, y los hallazgos fueron asimilados en la estructura del MEAP para asegurar que el marco evaluativo no solo fuera sólido desde una perspectiva teórica, sino también relevante en términos prácticos.

Los resultados obtenidos de la estabilización de este método MEAP abrieron la posibilidad de explorar una implementación práctica de las conclusiones obtenidas, a través de un

³¹ El término "Cono Sur" se refiere a la región geográfica más austral de América del Sur. Comprende principalmente tres países: Argentina, Chile y Uruguay, aunque en algunas definiciones también puede incluir partes del sur de Brasil y Paraguay. Esta región se caracteriza por tener similitudes culturales y históricas, así como condiciones geográficas y climáticas particulares debido a su ubicación en el sur del continente.

instrumento informático que permitiera su aplicación sencilla en futuros proyectos. Fue en la tercera etapa, entonces, que se desarrolló el plugin PREAPP. Se trata de una herramienta pensada para ofrecer recomendaciones fundamentadas a los profesionales de la construcción, ayudándoles a tomar decisiones informadas y eficientes en la implementación del sistema Astori. Se busca, así, ampliar los criterios de evaluación en el caso de sistemas prefabricados en hormigón, considerando una gama amplia de variables y escenarios.

De esta manera, esta tesis se adentra en el campo de la arquitectura prefabricada, abordando sus desafíos y posibilidades a través de un proceso dividido en etapas, cada una con su importancia y propósito definidos. En la primera se explora a fondo los aspectos fundamentales del sistema Astori, se comprende su aplicabilidad y potencial en diferentes contextos constructivos; en la segunda se desarrolla y aplica el MEAP para proporcionar un marco sólido y práctico de evaluación de la adaptación del sistema a la arquitectura civil. En la tercera etapa, se describe el proceso de diseño del plugin PREAPP. Este representa una contribución de las ciencias informáticas para mejorar la implementación práctica de sistemas prefabricados de hormigón en contextos no industriales, a lo que hemos llamado *arquitectura civil 4.0*. Pensado como un aporte para los profesiones del sector, la tesis aporta soluciones pragmáticas y amplía los horizontes de lo que se puede lograr en la arquitectura prefabricada, sentando las bases para futuras investigaciones y desarrollos en el área.



ETAPA I

Introducción

La fase inicial de esta investigación aborda de manera detallada el estado actual de los sistemas prefabricados de hormigón, destacando especialmente el sistema Astori, pionero y ampliamente reconocido y utilizado en Latinoamérica. La elección de este sistema se basó en su relevancia y representatividad no solo en la edificación industrial, sino en algunos intentos de adaptación y aplicación en la arquitectura civil. Nos ha servido de modelo para evaluar la viabilidad y eficacia de tales sistemas en proyectos arquitectónicos que respondan a demandas funcionales y formales exigentes.

En este segmento del estudio, se efectúa una revisión de la literatura existente sobre el sistema Astori y sobre los sistemas prefabricados en hormigón en general. Se investigan diferentes estudios anteriores, artículos técnicos y académicos, y documentaciones de proyectos, con el propósito de adquirir un conocimiento integral sobre la aplicación y rendimiento de estos sistemas. Este repaso bibliográfico se ve enriquecido con entrevistas a profesionales destacados en el campo, arquitectos, ingenieros y gestores de proyectos que han tenido experiencias directas con el sistema Astori, permitiendo añadir dimensiones prácticas y experiencias reales al análisis teórico previo.

Dentro de este marco, se busca comprender no solo las particularidades técnicas y constructivas del sistema prefabricado en hormigón, sino también los desafíos y ventajas que acompañan su implementación en proyectos arquitectónicos contemporáneos. Se pone un interés particular en descifrar cómo se pueden balancear los beneficios asociados a la economía de tiempos y la eficiencia con las limitaciones que puedan surgir durante su adaptación y aplicación en distintos contextos constructivos. Al culminar esta primera fase de la investigación, logra acumular un conocimiento detallado sobre los sistemas

prefabricados de hormigón, en particular en el sistema Astori que permite avanzar en la exploración de oportunidades de optimización e innovación en estos sistemas.

La Etapa I se compone de tres capítulos que examinan y revelan las particularidades de los sistemas prefabricados, destacando el rol de Astori en este ámbito. “Astori y la revolución prefabricada” proporciona un panorama histórico y conceptual sobre cómo y por qué el Sistema Astori resuelta un caso singular en el mundo de la prefabricación. Esta referencia histórica es esencial para comprender su relevancia y su influencia en las tendencias contemporáneas de construcción. En “Los elementos Astori y su explotación arquitectónica” se descubren los componentes del sistema, se detalla la ingeniería detrás de cada elemento y cómo estos pueden ser aprovechados en diferentes contextos arquitectónicos, ofreciendo una visión más técnica y aplicada de las posibilidades y limitaciones inherentes al sistema. En “Reflexiones finales”, se sintetiza lo observado, proporcionando una perspectiva sobre la aplicabilidad del sistema Astori en la arquitectura contemporánea.

Astori y la revolución prefabricada

Los sistemas constructivos prefabricados en hormigón emergieron como una solución a la construcción masiva luego de la Segunda Guerra Mundial, en particular en los campos de la industria, la vivienda y los equipamientos hospitalarios y educativos. Sin embargo, también fueron considerados en obras de vanguardia, forzando y adaptando su uso en construcciones singulares. Este fenómeno, que marcó las exploraciones de los años sesenta, ha tenido un singular reverdecir en obras destacadas en el Río de la Plata y asociado a un sistema pionero, el sistema Astori.

La prefabricación se caracteriza por la producción de componentes estandarizados fuera del sitio de construcción y su posterior ensamble in situ, desplegando una compleja amalgama de factores históricos, culturales y tecnológicos que se entrelazan para configurar su desarrollo actual. Se remonta a la humanidad primitiva, cuando las primeras agrupaciones humanas, nómades, construían sus viviendas de forma fácilmente montable y desmontable, adaptándose a las incertidumbres de su estilo de vida³². No obstante, no es hasta la evolución del maquinario industrial durante las revoluciones industriales del siglo XIX que se establecen las bases para lo que hoy conocemos como prefabricación³³. En este período de significativos cambios tecnológicos y culturales, se introdujo el concepto de reproducción en serie, lo que permitió la fabricación en masa de componentes estandarizados y sofisticados para la construcción. El sistema prefabricado de hormigón, reconocido por su fortaleza, versatilidad y economía, encontró su terreno fértil en esta época³⁴.

³² (Kelly, 2013). *The Lifeways of Hunter-Gatherers: The Foraging Spectrum*. Cambridge University Press.

³³ (Piore & Sabel, 1984). *The Second Industrial Divide: Possibilities for Prosperity*. Basic Books.

³⁴ (Gibb, 2001). *Standardization and pre-assembly—distinguishing myth from reality using case study research*. Construction Management & Economics, 19(3), 307-315.

Fue en las primeras décadas del siglo XX cuando se evidenciaron avances substanciales hacia la incorporación de esta modalidad en la arquitectura civil, en obras como las “Dom-Ino Houses” (Ilustración 1) de Le Corbusier y el “Théâtre des Champs-Élysées” (Ilustración 2) de Auguste Perret, pionero en el uso de hormigón armado. Le Corbusier y Perret exploraron las posibilidades del hormigón prefabricado, prometiendo una mayor flexibilidad y eficiencia constructiva, y pavimentando el camino para la adopción de estos sistemas en la arquitectura. La prefabricación asumió un rol determinante durante el proceso de reconstrucción de Europa en el posguerra, momento en el que la imperiosa necesidad de reconstruir ciudades devastadas exigía respuestas ágiles y eficientes³⁵.

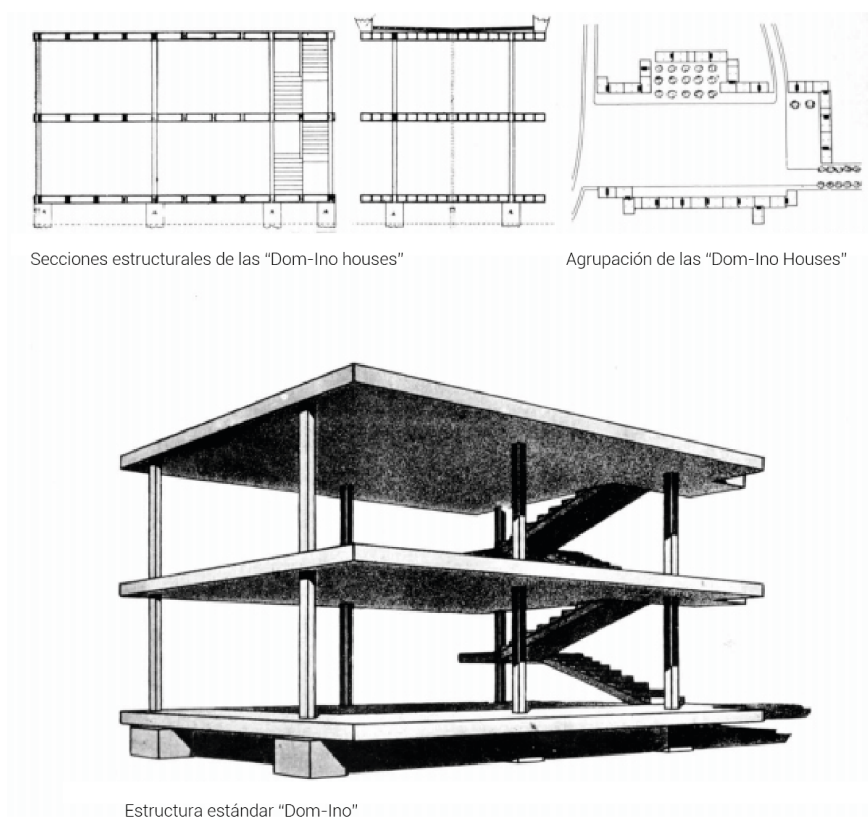


Ilustración 1 – Imágenes de la estructura de las “Dom-Ino Houses”, proyectadas por Le Corbusier. Secciones, plano y perspectiva de las “Dom-Ino Houses”. Recuperado de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/5032/Article09.pdf?sequence=6>.

³⁵ (Smith, 2014). *Fundamentals of building information modeling*. John Wiley & Sons.



Ilustración 2 – Imágenes del “Théâtre des Champs-Élysées”, proyectado por Auguste Perret. Fotografías del interior de la edificación [Conjunto de fotografías]. Recuperado de <https://parishistoirevivante.com/le-theatre-des-champs-elysees-architecture>.

Con el transcurso del tiempo, y especialmente a partir de las transformaciones durante los años ochenta con la aparición de nuevas tecnologías, la prefabricación ha vuelto a ocupar un lugar destacado en el campo de la construcción y la arquitectura. Se ha fomentado la implementación de modelos de producción más avanzados y adaptativos, respondiendo a los desafíos de escala, de rapidez y de flexibilidad de construcción en contextos y climas adversos. Se inauguró un enfoque de ciclo de producción abierto, en el cual distintas entidades se especializan en la creación de componentes específicos, luego integrados y ensamblados en el sitio.

Este enfoque se destaca por su adaptabilidad y flexibilidad, y por permitir una amplia gama de ajustes y modificaciones durante el proceso productivo. Esto se traduce en la posibilidad de personalizar componentes, adecuar los elementos a las especificaciones del proyecto e incorporar innovaciones tecnológicas o nuevos materiales. Así, este modelo de producción resalta por su capacidad para abordar y satisfacer demandas y necesidades cambiantes del sector de la AIC e incluso adaptarse a los requerimientos de obras “únicas”, con gran énfasis en su definición formal singular, propias de la arquitectura civil.

Con el progreso de la tecnología, los sistemas prefabricados en hormigón han mostrado una adaptabilidad y capacidad de evolucionar para cumplir con las nuevas demandas del sector. Esta adaptación e innovación no es únicamente observable a nivel global, sino también, y de manera destacada, en los países del entorno del Río de la Plata.

El eje del río de la Plata

En el contexto de los países latinoamericanos, la evolución e integración de estos sistemas presentan rasgos distintivos. A diferencia de otras regiones del mundo, donde la construcción prefabricada ha experimentado una integración rápida y efectiva, su incorporación ha transcurrido de manera más lenta y gradual. La economía, la logística y aspectos culturales han desempeñado un rol crucial en este proceso diferenciador. En diversas regiones de América Latina, la mano de obra suele tener un costo inferior comparado con otros continentes, incentivando por ende la prevalencia de técnicas de construcción tradicionales³⁶. Paralelamente, los costos inherentes al transporte de componentes prefabricados, desde los centros de producción hasta los emplazamientos de construcción, han constituido un impedimento considerable. A estos factores se añaden

³⁶ (Schodek, Bechthold, Griggs, Kao, & Steinberg, 2005). *Digital Design and Manufacturing: CAD/CAM Applications in Architecture and Design*. John Wiley & Sons.

barreras culturales y preconcepciones relativas a la calidad, las cuales han restringido la adopción masiva de métodos prefabricados de construcción.

La posible transición hacia estos métodos de construcción prefabricada también implican notables desafíos en el ámbito laboral. Demandan un alto nivel de capacitación y los sindicatos han percibido la automatización creciente de los procesos como una amenaza a la estabilidad laboral³⁷. Asimismo, las políticas y normativas gubernamentales han tenido un impacto considerable. Los códigos de construcción y las regulaciones actuales no están alineados con los requisitos específicos de la construcción prefabricada, lo que establece obstáculos legales y burocráticos³⁸. Concurrentemente, han faltado políticas incentivadoras, a lo que se añade una percepción cultural que sugiere una supuesta inferioridad en la calidad de la construcción prefabricada en comparación con los métodos tradicionales. Finalmente, la infraestructura tecnológica necesaria para respaldar la fabricación y ensamblaje de componentes prefabricados sigue sin estar disponible en varias regiones.

No obstante, ha habido avances significativos. Distintas iniciativas han superado obstáculos y adaptado la tecnología a las condiciones locales. Entre ellas, un referente sobresaliente ha sido el sistema Astori, ampliamente adoptado en el eje del Río de la Plata, tal como se refleja en la Ilustración 3. Argentina y Uruguay han puesto a prueba las ventajas y la factibilidad de esta modalidad constructiva, liderando esfuerzos en la adaptación de estos sistemas, incluso a programas no industriales para los que no fueron diseñados originalmente.

³⁷ (Jaselskis & Ashley, 1991) *Optimal allocation of project management resources for achieving success*. Journal of Construction Engineering and Management, 117(2), 321-340.

³⁸ (Hernández C. , 2015). *Recent developments in architectural fabric structures* En. Latin America. Fabric Structures in Architecture, 585-660.

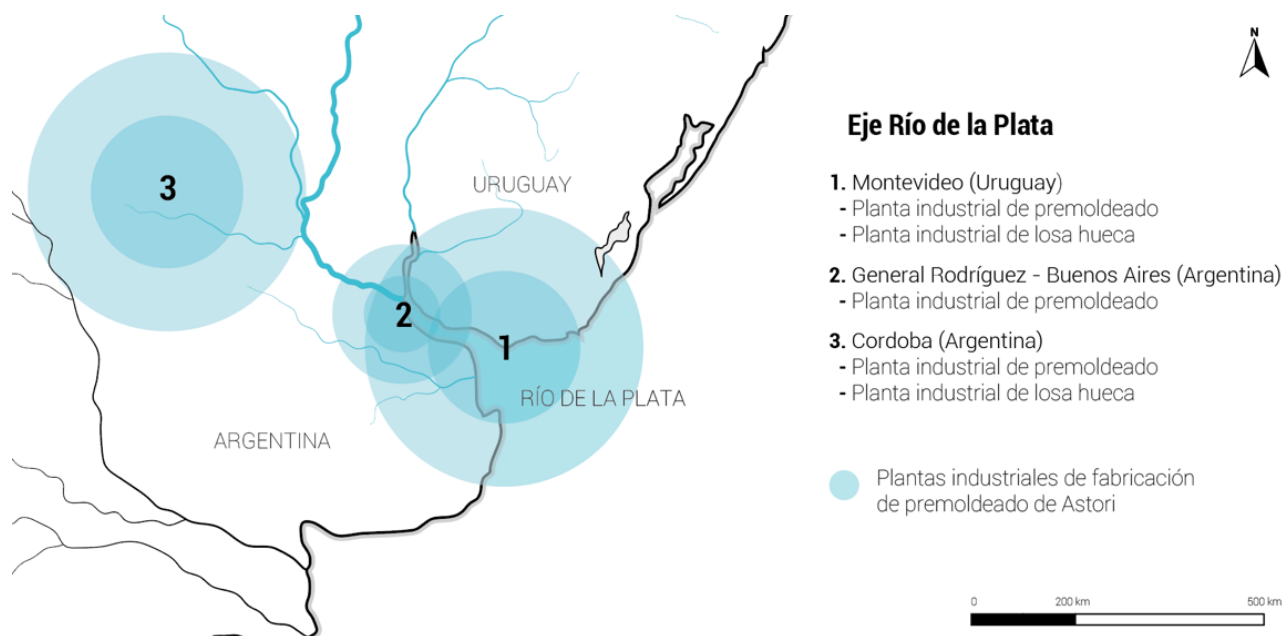


Ilustración 3 – Representación esquemática del Eje del Río de la Plata. Fuente: Elaboración propia.

El caso Astori y las nuevas demandas desde la arquitectura civil

El sector de la construcción ha experimentado progresos constantes, donde el ritmo de innovación ha dado lugar a nuevos líderes y pioneros. Tal es el caso de Astori Estructuras S.A., empresa que opera industrialmente en Argentina y Uruguay, especializada en sistemas constructivos prefabricados en hormigón, que ha sabido abordar con eficacia las deficiencias de la construcción tradicional, en especial, la falta de integración y la utilización ineficiente de recursos.

Desde su inicio en 1966, la empresa fue concebida como una respuesta a la creciente demanda de soluciones más eficientes y económicas en la región. Piero Astori, al identificar la oportunidad de renovar el paradigma de construcción existente, vislumbró la posibilidad de implementar métodos más eficientes, rápidos, económicos y duraderos. El objetivo de Astori era sencillo pero ambicioso: revolucionar el sector de la construcción al ofrecer soluciones rápidas, rentables y de alta calidad.



Ilustración 4 – Fotografías del inicio de las operaciones de la empresa Astori en Argentina. Fuente: Astori Estructuras S.A. (n.d.). Fotografías [Conjunto de fotografías]. Recuperado de <https://www.astoriestructuras.com.ar/novedad/50-anos-de-astori>.

Hasta la fecha, Astori Estructuras S.A. ha realizado más de 15 mil obras en América Latina. Sus proyectos abarcan una variedad de estructuras, incluyendo naves industriales, viviendas, edificios en altura, supermercados, centros comerciales, estadios deportivos, gimnasios, estacionamientos, escuelas, universidades, edificios de oficinas, terminales de autobuses, silos, pabellones para exposiciones, cárceles, hangares, e incluso capillas.

La presencia de Astori en Argentina se refleja en sus dos plantas industriales ubicadas en Córdoba y General Rodríguez, en la provincia de Buenos Aires, destinadas a la producción de elementos prefabricados. Además, la empresa opera una planta especializada en la fabricación de losa hueca en Córdoba. Astori expandió sus operaciones a Uruguay en 2011 con la adquisición de la empresa uruguaya Flasur³⁹, estableciendo plantas industriales en Montevideo y consolidando su presencia en los principales países del Mercosur.

Originalmente concebido para satisfacer las necesidades del sector industrial, el sistema Astori ha logrado adaptarse exitosamente para cumplir con los requisitos y demandas específicas de la arquitectura civil, proceso que ha demandado una inversión significativa en investigación y desarrollo. Conforme a lo expresado por Rodrigo Arangañas en una entrevista realizada en noviembre de 2017⁴⁰, este proceso fue motivado por el deseo de la empresa de ampliar su impacto y explorar nuevas posibilidades en el mercado.

Desde su creación, Astori ha diversificado su portafolio de productos y servicios, y respondido de manera efectiva a necesidades emergentes del campo de la arquitectura civil. En sus primeros años, la empresa se especializó en la producción de bloques de hormigón y tuberías de alcantarillado, pero con el transcurso del tiempo, amplió su gama de productos para incluir elementos como vigas, losas, paneles y módulos prefabricados. Durante la década de 1990, Astori amplió aún más su oferta, introduciendo productos para construcción en seco y extendiendo su alcance a otros mercados de América Latina y el Caribe. La empresa se ha mantenido a la vanguardia, proporcionando soluciones que cumplen con nuevas expectativas en eficiencia, sostenibilidad y calidad. El hormigón reforzado con fibra de vidrio (GRC – Glass Reinforced Concrete) es un claro ejemplo de

³⁹ La empresa Flasur Astori, especializada en premoldeados, surgió en 2011 tras la adquisición de la uruguaya Flasur (establecida en 1997) por parte de la argentina Astori Estructuras. Aunque originalmente ofrecía servicios industriales, metalúrgicos y de montaje, con el tiempo diversificó sus actividades, incluyendo el diseño, la construcción y el montaje de estructuras prefabricadas de hormigón pretensado.

⁴⁰ Entrevista realizada por la autora a Rodrigo Arangañas, en la planta industrial de Córdoba, en noviembre de 2017.

cómo Astori ha sabido ofrecer una flexibilidad proyectual considerable a arquitectos e ingenieros.

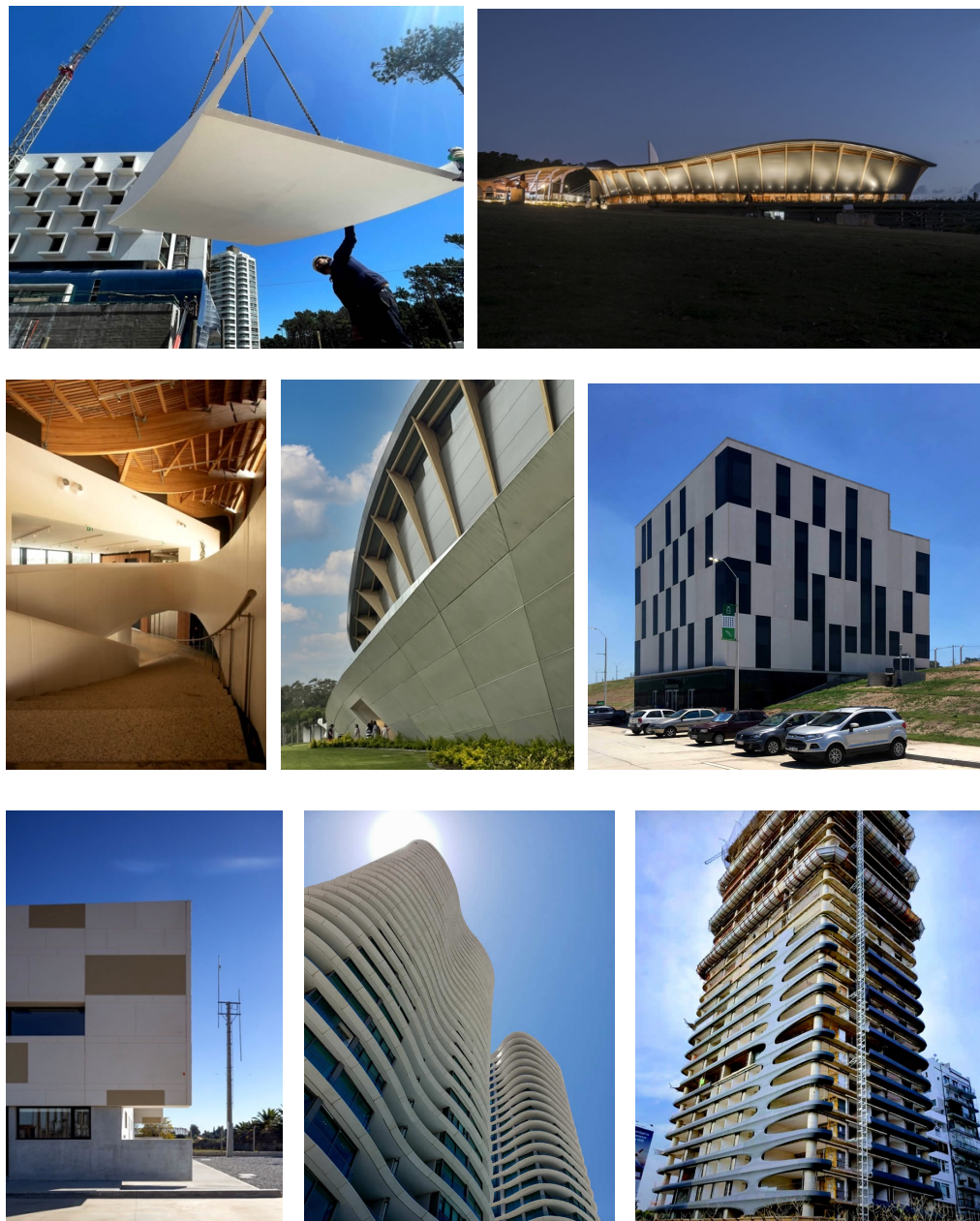


Ilustración 5 – Obras que utilizaron el hormigón con fibra de vidrio (GRC). Fuente: Astori Estructuras S.A. (n.d.). Fotografías [Conjunto de fotografías]. Recuperado de <https://www.astoriestructuras.com.ar/picast>.

Además, Astori incorporó la tecnología digital desde los inicios de la empresa, con el objetivo de mejorar sus operaciones. Por ejemplo, rápidamente adoptó herramientas de diseño asistido por ordenador (CAD) para mejorar la precisión en el diseño y la fabricación, lo que permitió reducir los errores, mejorar la colaboración interna y acelerar tiempos de comercialización.



Ilustración 6 – Obras que utilizaron el hormigón con fibra de vidrio (GRC). Fuente: Astori Estructuras S.A. (n.d.). Fotografías [Conjunto de fotografías]. Recuperado de <https://www.astoriestructuras.com.ar/novedad/50-anos-de-astori>.

Astori también mostró un fuerte compromiso con la sostenibilidad. Implementó diversas prácticas de construcción ecológica, como el uso de materiales reciclados y el fomento de la eficiencia energética en sus proyectos, reforzando su reputación como líder en la industria, y cumpliendo con expectativas crecientes entre sus clientes en términos de responsabilidad ambiental.

Astori a nivel nacional e internacional

Astori experimentó una notable expansión, más allá de las fuertes y redundantes crisis económicas y productivas argentinas que han afectado la continuidad de las empresas industriales. No solo se destaca en su país de origen, sino que ha alcanzado renombre

internacional. En los años noventa, Astori extendió sus operaciones más allá del Río de la Plata, comenzando su expansión en Brasil y, más adelante, llevando su influencia a Paraguay, Chile y Perú. En estos países, Astori no sólo se centró en la construcción de edificios residenciales y comerciales sino también incursionó activamente en proyectos de infraestructura vial y portuaria.

En la última década, Astori consolidó su presencia embarcándose en proyectos de gran envergadura en el extranjero. Exploró nuevos horizontes en la construcción industrial, contribuyendo a la construcción de las plantas de celulosa en Uruguay y Brasil, y ratificó su compromiso con la sostenibilidad ambiental a través de su participación en proyectos de energía renovable en Chile y Uruguay.

El Sistema Astori y otros sistemas prefabricados

En estas últimas décadas, la prefabricación en hormigón experimentó un desarrollo significativo, pero con características diversas en las distintas regiones del mundo. En Europa, la prefabricación en hormigón está fuertemente arraigada en Francia, Italia y Alemania. Estas naciones han invertido en I+D (Investigación y Desarrollo) y han desarrollado sistemas que reflejan una combinación de innovación tecnológica y décadas de experiencia.

En Alemania, el sistema BBS (Beton-Bausystem) es conocido por su eficiencia y adaptabilidad, y por ser el resultado de una larga tradición de la ingeniería. Su diseño permite un montaje ágil, optimizando los tiempos de construcción, mientras que garantiza un aislamiento térmico efectivo para edificaciones con mayor eficiencia energética. Además, la flexibilidad del sistema se adapta a demandas funcionales y estéticas, respaldado por la infraestructura tecnológica alemana y su énfasis en la precisión y calidad. Un ejemplo destacado es el edificio de oficinas en Berlín ejecutado por Brüninghoff GmbH & Co. en

2015 (Ilustración 7). El proyecto, distribuido en tres plantas, se adapta a diversos formatos de oficinas, ya sean celulares, grupales o combinadas. Las instalaciones se integran en conductos empotrados en el piso, garantizando una libertad formal de acabado interior y exterior. Además, los componentes de hormigón tienen una masa térmica para mejorar el aislamiento térmico, cumpliendo con los requisitos de la Ordenanza de Ahorro de Energía en Alemania⁴¹, la EnEV 2016.



Ilustración 7 – Edificio de oficinas ejecutado por Brünighoff GmbH & Co. en 2015 utilizando el sistema Beton-Bausystem. Fotografías [Conjunto de fotografías]. Recuperado de https://www.detail.de/de_de/holz-beton-bausystem-fuer-buerogebaeude-13258.

En Francia, predomina la producción de componentes prefabricados de hormigón con la colaboración entre la industria, la academia, y el gobierno. Este enfoque colaborativo y el compromiso con la innovación lo han convertido en un modelo de construcción eficiente y avanzado. Un reflejo de este avance es el Museo de las Civilizaciones de Europa y el Mediterráneo (MuCEM) en Marsella (Ilustración 8), que se destaca por emplear el

⁴¹ Esta normativa impone estrictos requisitos de eficiencia energética para los edificios, tanto nuevos como en renovación, con el objetivo de reducir el consumo global de energía y las emisiones de dióxido de carbono. Los criterios abarcan la calidad térmica de la envoltura del edificio y la eficiencia de los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado, fomentando además el uso de fuentes de energía renovable.

hormigón de ultra alto rendimiento (UHPC). Inaugurado en 2013, el proyecto del arquitecto Rudy Ricciotti se destaca por su fachada de enrejado de hormigón, optimizando el control solar y la resistencia a la corrosión marina. El uso de UHPC facilitó la ejecución del diseño al permitir formas arquitectónicas complejas que demandan alta resistencia al esfuerzo y la tensión, cumpliendo con exigencias estéticas y funcionales.

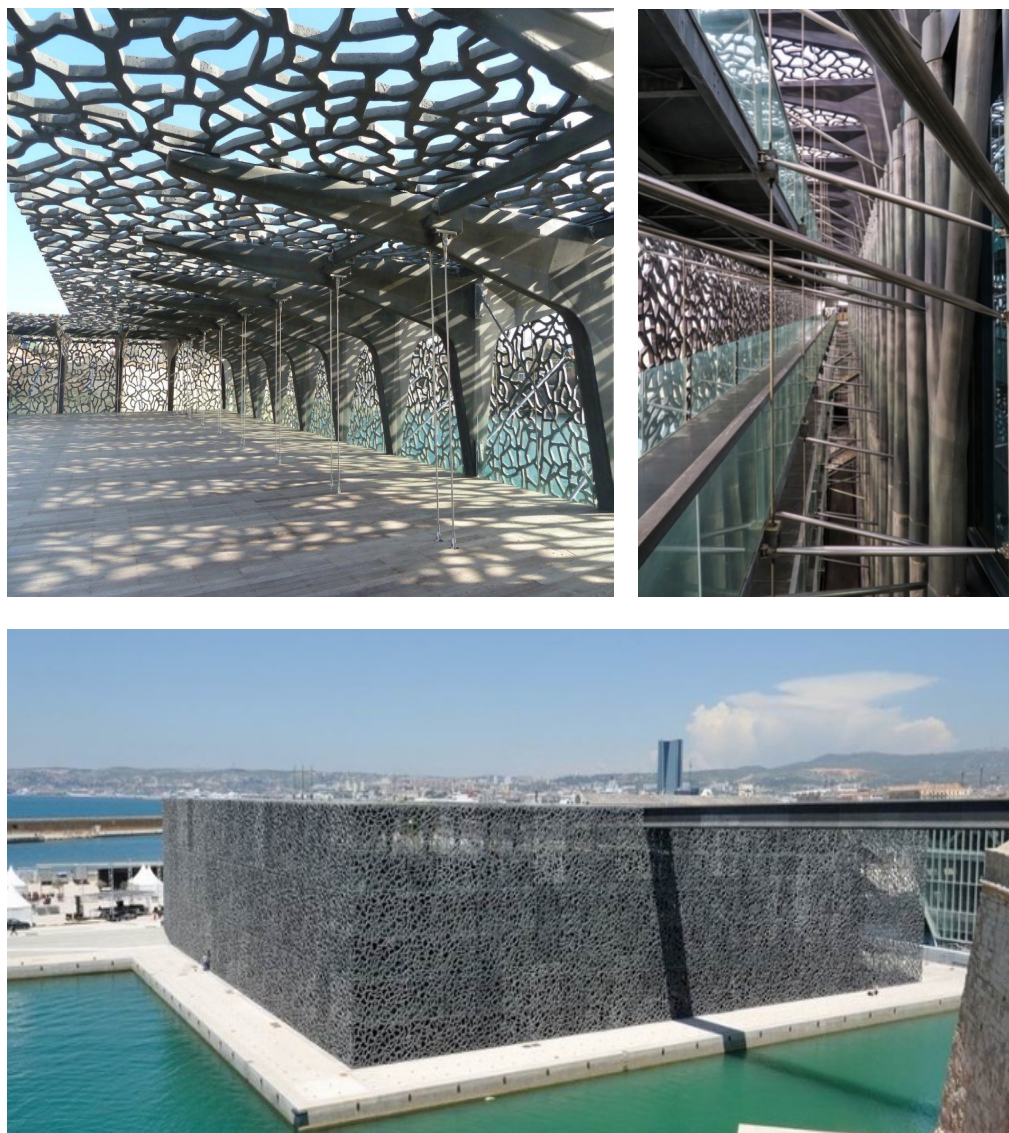


Ilustración 8 – Museo de las Civilizaciones de Europa y el Mediterráneo (MuCEM) en Marsella, Francia. Fotografías [Conjunto de fotografías]. Recuperado de <https://www.marseille.hu/le-museum>.

Italia también se distingue por la implementación de sistemas constructivos prefabricados, valorados por su versatilidad y adaptabilidad a distintos contextos y necesidades. En particular, los módulos tridimensionales han cobrado popularidad debido a su eficiencia en el proceso constructivo. Un ejemplo emblemático es el Bosco Verticale en Milán (Ilustración 9), una obra del arquitecto Stefano Boeri completada en 2014. Este proyecto combinó módulos tridimensionales con jardines verticales, asegurando precisión y seguridad en la construcción. Dicha técnica marca un avance significativo hacia una construcción rápida y sostenible, sobre todo en zonas urbanas, al minimizar residuos y ruido, además de ofrecer opciones de personalización de diseño.

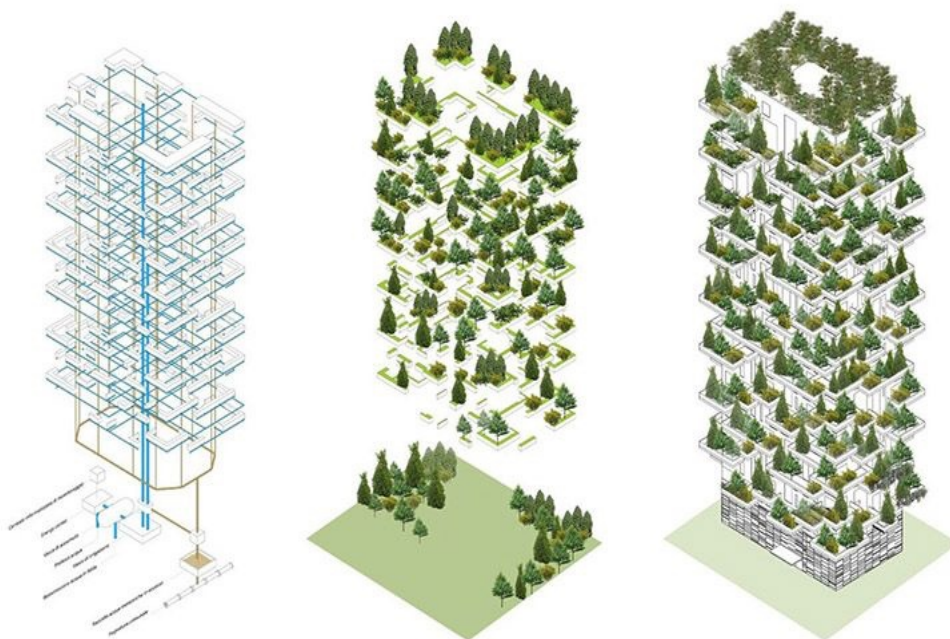


Ilustración 9 – Bosco Verticale en Milán, Italia. Fotografías [Conjunto de fotografías]. Recuperado de <https://www.infobuildenergia.it/approfondimenti/stefano-boeri-larchitetto-della-biodiversita-urbana>.

Resulta fundamental reconocer cómo diversos sistemas constructivos reflejan la influencia de su entorno y la tradición a la que pertenecen. Reflejan los valores, las prioridades, pero

también los límites de un contexto al que, de algún modo, pretenden desarrollar. Lo notable en el caso de Astori es haber sabido responder a los retos del contexto latinoamericano, las barreras perceptuales respecto a la calidad y la escasez de infraestructura tecnológica para la producción y la logística. Exploremos ahora sus componentes.

Los elementos Astori y su explotación arquitectónica

Dentro de la AIC, los componentes del sistema Astori emergen como elementos clave en la transformación innovadora de la industria de construcción prefabricada. No son solo partes estructurales, sino unidades de diseño manipulables y adaptables, capaces de concretar visiones arquitectónicas excepcionales. El estudio detallado de sus propiedades, texturas y capacidades de soporte permite ampliar el rango de opciones creativas.

La prefabricación por elementos abre puertas a un diseño más libre y creativo, facilitando la concepción de edificios singulares y estéticamente impactantes. Además, permite mayor precisión en la producción y minimiza la necesidad de trabajos de acabado adicionales, mejorando la calidad estética y funcional del resultado final.

El término “explotación arquitectónica” refiere al uso y la aplicación de ciertos elementos o sistemas constructivos en el campo de la arquitectura. En el contexto de esta tesis, alude específicamente a cómo los elementos del sistema Astori se utilizan en la práctica arquitectónica, revelando cómo arquitectos e ingenieros aprovechan estos componentes para diseñar y construir edificaciones y estructuras singulares en combinaciones inesperadas. La explotación arquitectónica del sistema representa un modo innovador de aplicarlo, y permite explorar posibilidades estéticas y funcionales a través de estructuras que, además de eficientes y duraderas, resulten visualmente significativas.

Los componentes del sistema Astori han sido implementados en una variedad de proyectos, desde viviendas unifamiliares y edificios de apartamentos hasta construcciones industriales y comerciales. Para entender cómo se han adaptado, resulta crucial conocer sus componentes, su versatilidad y adaptabilidad.

El arte y la ciencia detrás del sistema Astori

El sistema Astori fue concebido para optimizar los procesos de edificación y para reducir costos. Cada elemento funciona colectivamente para conformar la infraestructura principal de una construcción. Por ejemplo, los paneles de cerramiento son decisivos no sólo en la definición de la envolvente del edificio, sino para su configuración estética y eficiencia energética. Las losas prefabricadas, fundamentales por su capacidad para soportar cargas y formar pisos, son esenciales para modelar el edificio y establecer su funcionalidad.

Fabricar estos componentes en un ambiente controlado asegura la homogeneidad y la calidad de cada pieza, pero conduce a interrogantes sobre su adaptabilidad. ¿Es posible personalizarlos para abordar requerimientos específicos de diseño y de contexto? ¿Cuáles son las restricciones que imponen la flexibilidad?

La durabilidad y la funcionalidad de cada elemento Astori son fundamentales para determinar su aplicabilidad. Los paneles de cerramiento deben ofrecer aislamiento térmico y acústico adecuado que, más allá de mantener su integridad estructural, permita satisfacer distintas aplicaciones arquitectónicas. Resulta indispensable reconocer las posibles limitaciones del sistema y los retos que podrían emerger al incorporarlos en diseños muy personalizados. Por supuesto, también es necesario considerar los cuestionamientos a la sostenibilidad y el impacto ambiental del sistema.

A través de un análisis minucioso de las propiedades técnicas y funcionales del sistema Astori, se busca entender los límites de su operatividad y aplicabilidad y, además, identificar aspectos particulares y subsistemas pertinentes en los estudios de caso.

Cerramientos Lisos

Los cerramientos lisos de Astori (Ilustración 10) son una solución prefabricada para la construcción de muros y paredes tanto interiores como exteriores. Hechos de hormigón armado, proporcionan una alta resistencia estructural y una estética limpia y moderna.



Ilustración 10 – Edificaciones con cerramientos lisos de Astori. Fuente: Astori Estructuras S.A. (n.d.). Fotografías [Conjunto de fotografías de las obras realizadas con paneles de cerramiento liso]. Recuperado de <https://www.astoriestructuras.com.ar/sistemas/cerramientos-lisos>.

Pueden ser considerados como una solución minimalista en términos de diseño (Ilustración 11). Aunque su apariencia sobria puede ser atractiva en ciertos contextos, también plantea preguntas sobre su versatilidad y su capacidad de responder a demandas específicas de cada proyecto, en tanto su uniformidad puede limitar la expresión arquitectónica y la posibilidad de crear fachadas distintivas.

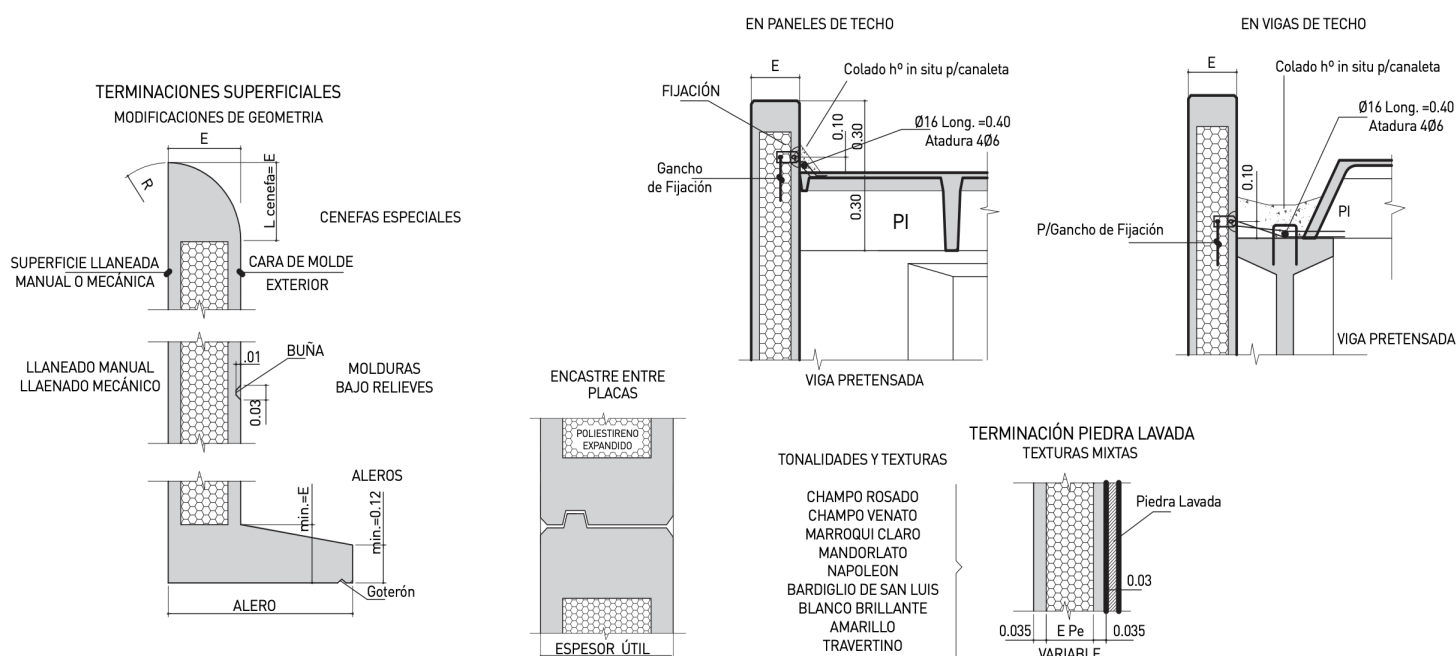


Ilustración 11 – Detalle de los paneles de cerramiento. Fuente: Astori Estructuras S.A. (n.d.). Cortes de los paneles de cerramiento liso [Conjunto de cortes de los paneles de cerramiento liso]. Recuperado de <https://www.astoriestructuras.com.ar/sistemas/cerramientos-lisos>.

En términos de instalación y construcción, los cerramientos lisos brindan eficiencia y velocidad en la obra. En cuanto a la resistencia y la durabilidad a largo plazo, la calidad de los materiales y la ejecución son factores críticos, en tanto, cualquier deficiencia podría resultar en problemas de aislamiento, humedad y desgaste prematuro. La falta de textura y

de patrones en estos cerramientos también podrían exponer cualquier imperfección o error en la instalación, haciéndolo más evidentes en comparación con elementos más detallados.

Encuentran su lugar en proyectos donde la simplicidad y la coherencia estética son prioridades, sin embargo debe evaluarse su resistencia a condiciones climáticas extremas y cambios ambientales, ya que la apariencia lisa podría ocultar problemas de mantenimiento y degradación.

Cerramientos Nervurados

Los cerramientos nervurados de Astori son una variante del sistema de cerramientos lisos. Están conformados por paneles de hormigón prefabricados, destinados principalmente a la construcción de muros y paredes (Ilustración 12).



Ilustración 12 – Edificaciones con cerramiento nervurado de Astori. Fuente: Astori Estructuras S.A. (n.d.). Fotografías [Conjunto de fotografías de obras realizadas con paneles de cerramiento nervurado]. Recuperado de <https://www.astoriestructuras.com.ar/sistemas/cerramientos-nervurados>.

Cumplen con su función estructural, pero además incorporan una dimensión estética al incorporar texturas distintivas en las fachadas, enriqueciendo la expresión visual del

edificio y ofreciendo alternativas a los acabados tradicionales. Por su capacidad de contribuir con su textura a realzar la identidad arquitectónica del proyecto, pueden considerarse como un instrumento de diseño que amplía las posibilidades estéticas, además de las constructivas, y fomenta la exploración de nuevas formas y expresiones en la arquitectura contemporánea.

Desde una perspectiva técnica, las nervaduras añaden complejidad a la fabricación y al proceso de montaje, con implicaciones en los costos y los tiempos de construcción, elementos que deben ser evaluados en relación con el valor estético que aportan. Además, estas texturas pueden influir negativamente en la eficiencia energética del edificio y entorpecer la instalación de aislamientos térmicos y acústicos debido a su geometría irregular (Ilustración 13).

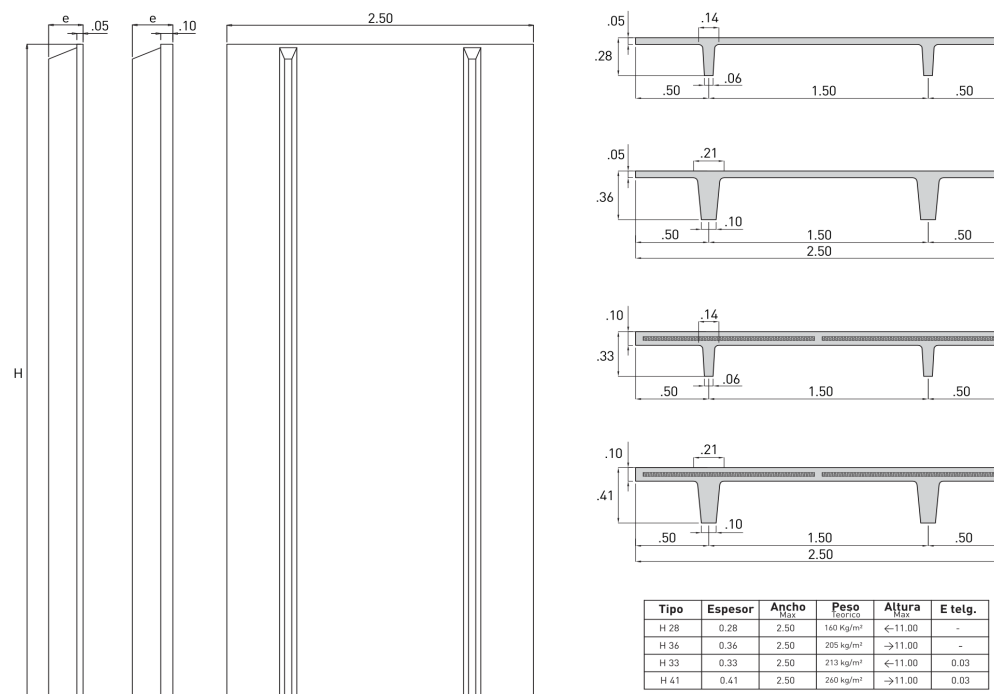


Ilustración 13 – Detalle de los paneles de cerramiento nervurado. Fuente: Astori Estructuras S.A. (n.d.). Cortes y vistas de los paneles de cerramiento nervurado [Conjunto de cortes y vistas]. Recuperado de <https://www.astoriestructuras.com.ar/sistemas/cerramientos-nervurados>.

La durabilidad y el mantenimiento también pueden resultar críticas. Al acumular suciedad con mayor facilidad, estas superficies texturadas pueden requerir un mantenimiento más frecuente y específico para conservar la apariencia original del edificio. También debe considerarse la resistencia a largo plazo de estas texturas en entornos diversos, ya que podrían estar más expuestas al desgaste y a los efectos climáticos.

Entrepisos

Los entrepisos de Astori (Ilustración 14) son losas prefabricadas de hormigón utilizadas para la construcción de pisos y techos en edificios de varios niveles. Proporcionan una solución rápida y eficiente para la creación de niveles adicionales, permitiendo aprovechar al máximo el espacio vertical en los proyectos.



Ilustración 14 – Edificaciones con entrepisos de Astori. Fuente: Astori Estructuras S.A. (n.d.). Fotografías [Conjunto de fotografías de las obras realizadas con entrepisos de Astori]. Recuperado de <https://www.astoriestructuras.com.ar/sistemas/entrepisos>.

Aunque suele pasar desapercibido a simple vista, el diseño y la ejecución del entrepiso juegan un papel fundamental en la habitabilidad y el uso eficiente del espacio en edificios de múltiples niveles. En términos de diseño estructural, los entrepisos Astori ofrecen una ventaja clave: su capacidad de adaptarse a diferentes cargas y necesidades funcionales. Sin

embargo, esta adaptabilidad también puede ser un desafío. El proceso de diseño (Ilustración 15) y cálculo debe ser riguroso para asegurar que cada entrepiso satisfaga las demandas específicas de carga, lo que podría aumentar la complejidad y el tiempo necesario para su implementación.

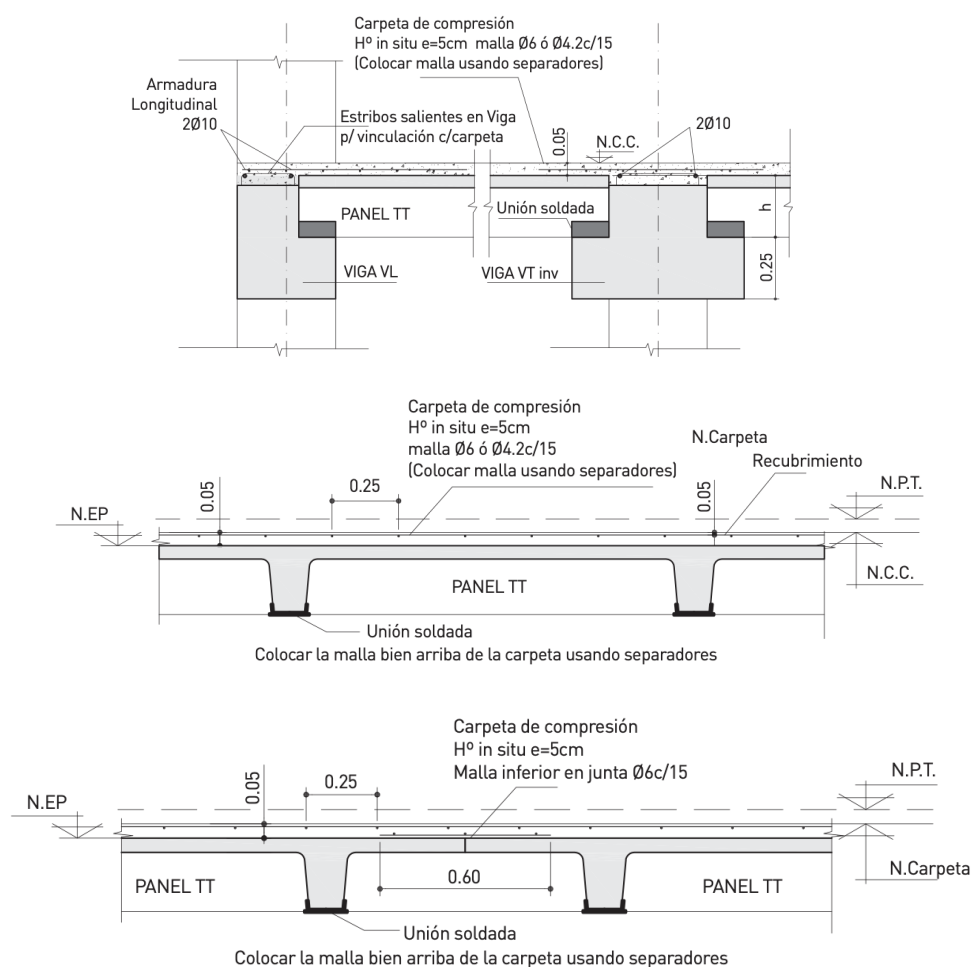


Ilustración 15 – Detalle de los entrepisos. Fuente: Astori Estructuras S.A. (n.d.). Cortes y vistas de los entrepisos [Conjunto de cortes y vistas de los entrepisos]. Recuperado de <https://www.astoriestructuras.com.ar/sistemas/entrepisos>.

La integración de sistemas MEP (Mechanical, Electrical, and Plumbing – en español, mecánicos, eléctricos y de fontanería) también plantea consideraciones críticas. El espacio

disponible en los entresijos puede ser limitado, lo que podría influir en la colocación y el mantenimiento de estos sistemas. Además, el acceso a los entresijos para realizar inspecciones y reparaciones puede ser complicado, lo que podría aumentar los costos y los inconvenientes a lo largo del ciclo de vida del edificio.

La elección de los materiales para los entresijos también es un aspecto clave. Es esencial evaluar si estos elementos cumplen con los requisitos de resistencia al fuego y aislamiento acústico necesarios para el uso previsto del edificio.

Estadios - Tribunas

Astori ha desarrollado un sistema especializado para la construcción de estadios y tribunas (Ilustración 16). Este sistema utiliza elementos prefabricados de hormigón para construir gradas de forma rápida, y la eficiencia en el montaje es esencial para estos proyectos de gran envergadura. Son altamente resistentes y duraderos, capaces de soportar las altas cargas asociadas con grandes multitudes y en condiciones climáticas adversas. Esto garantiza la seguridad y la longevidad de las tribunas, minimizando la necesidad de mantenimiento y reparaciones costosas.

Su desafío es la seguridad estructural, teniendo en cuenta la gran cantidad de personas que se congrega en estos espacios; en particular la interacción entre elementos prefabricados y las demandas de cargas en vivo, como las generadas por multitudes en movimiento o eventos deportivos, que exigen un análisis cuidadoso, un diseño detallado (Ilustración 17) y la implementación de soluciones robustas.

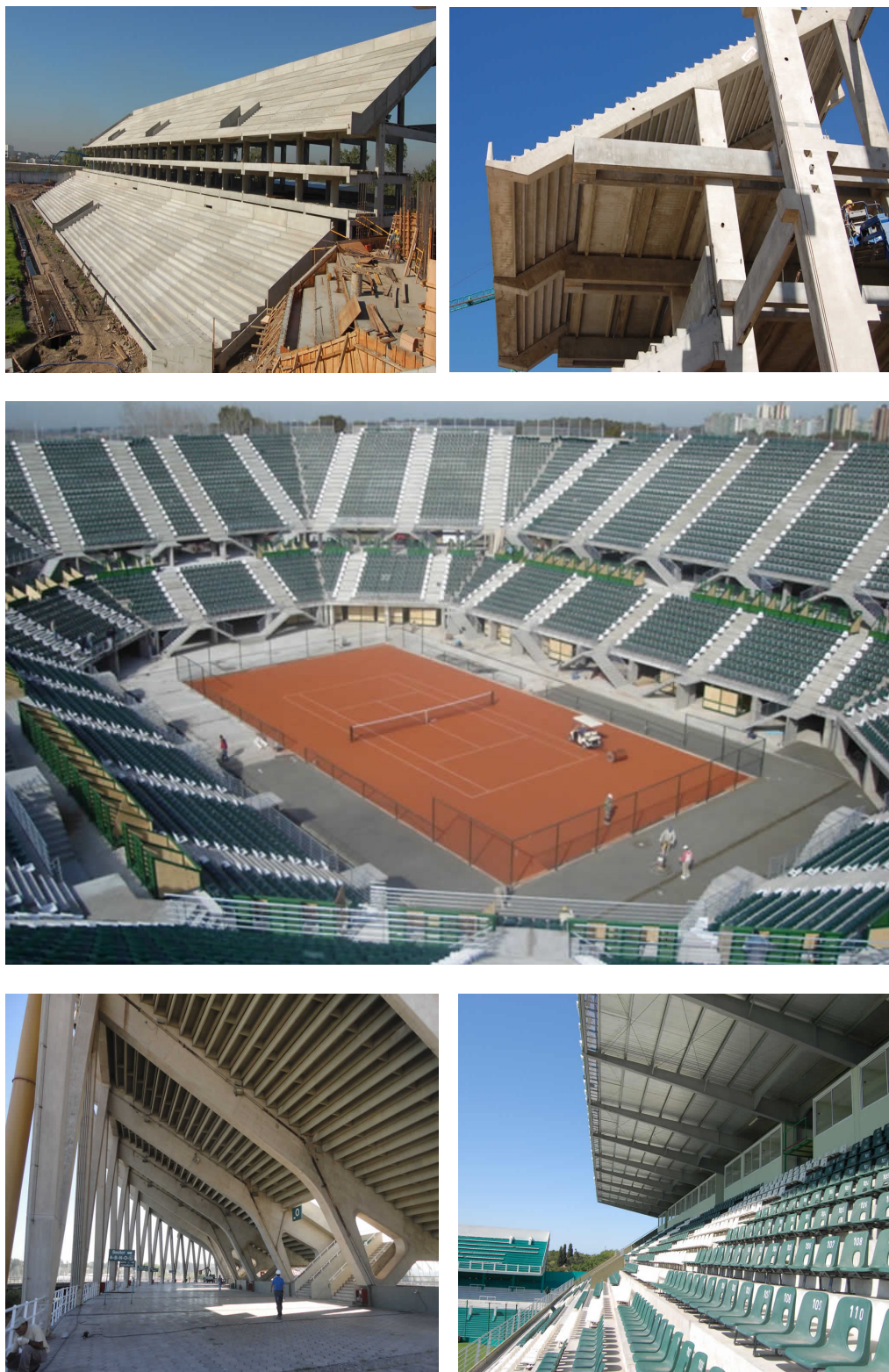


Ilustración 16 – Edificaciones con el sistema de Estadios y Tribunas de Astori. Fuente: Astori Estructuras S.A. (n.d.). Fotografías [Conjunto de fotografías de las obras realizadas con el sistema]. Recuperado de <https://www.astoriestructuras.com.ar/sistemas/estadios>.

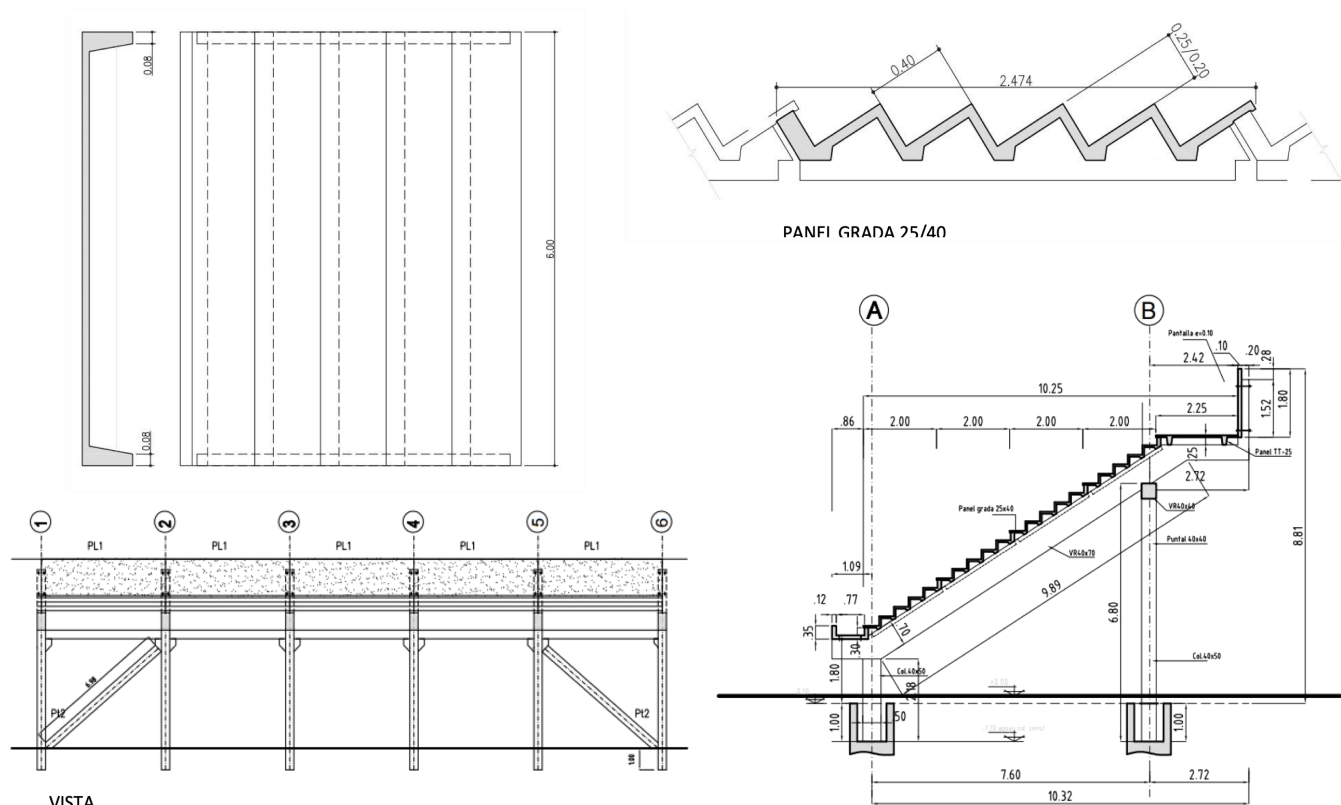


Ilustración 17 – Detalle del sistema de Estadios y Tribunas. Fuente: Astori Estructuras S.A. (n.d.). Cortes y vistas del sistema de Estadios y Tribunas [Conjunto de cortes y vistas del sistema]. Recuperado de <https://www.astoriestructuras.com.ar/sistemas/estadios>.

Otro aspecto crítico es la acústica y el confort para los espectadores. Los estadios y tribunas deben ofrecer una experiencia agradable en términos de visibilidad y audibilidad para todos los asistentes. La reflexión y absorción del sonido deben ser consideradas en el diseño de los materiales y la disposición de los componentes. El ruido generado por la multitud y las instalaciones también son factores que deben abordarse adecuadamente.

La integración de sistemas MEP es otro desafío. Estos sistemas deben cumplir con altos estándares de seguridad y rendimiento, y su diseño y ubicación deben garantizar un funcionamiento óptimo en un entorno complejo. La implementación de sistemas de evacuación y seguridad también es esencial para garantizar la seguridad de los asistentes en

caso de emergencia. La colaboración interdisciplinaria y una cuidadosa consideración de estos factores son fundamentales para lograr estadios y tribunas funcionales.

Sistema Constructivo de Vivienda

El sistema constructivo de vivienda de Astori (Ilustración 18) pretende aportar una solución integral. Combina paneles de cerramiento, losas de piso y techo, escaleras y elementos complementarios, para definir una vivienda de calidad, eficiente en términos de energía. Se puede montar en forma rápida y fácil, reduciendo los plazos de construcción y minimizando los costos. Además, la prefabricación garantiza la calidad y uniformidad de los elementos, lo que resulta en una vivienda con mayor rendimiento y durabilidad.



Ilustración 18 – Sistema constructivo de viviendas. Fuente: Astori Estructuras S.A. (n.d.). Fotografías [Conjunto de fotografías de las obras realizadas con el sistema constructivo de viviendas]. Recuperado de <https://www.astoriestructuras.com.ar/sistemas/sistema-constructivo-de-vivienda>.

Un aspecto crítico reside en la capacidad de adaptarse a las necesidades y preferencias de los futuros residentes, enfrentando desafíos en cuanto a la flexibilidad para personalizaciones y ajustes conforme a diversos contextos y estilos de vida. También se requiere una planificación previa de la infraestructura para su montaje, la logística de transporte y el almacenamiento de elementos. Además, es necesario cierto nivel de capacitación de la mano de obra, ya que en determinadas etapas, solo los operarios especializados pueden garantizar la correcta instalación de los componentes en el sitio.

Sistema Mixto

El sistema mixto Astori se plantea como una fusión estratégica de dos sistemas distintos: el hormigón armado (H°A°) pretensado y la cubierta metálica de alta estanqueidad (Ilustración 19). Esta combinación busca integrar las fortalezas inherentes a cada sistema y ofrecer soluciones versátiles en términos de diseño y funcionalidad.

La integración del hormigón pretensado ofrece la capacidad de abarcar grandes luces, facilitando así la concepción de espacios vastos y sin obstrucciones. Este aspecto es particularmente significativo en proyectos que requieren de áreas diáfanas, libres de la interferencia de columnas intermedias, proporcionando una sensación de apertura y libertad espacial.

Al permitir la creación de espacios abiertos y continuos, favorece la realización de proyectos arquitectónicos que valoran la fluidez y la transparencia espacial, optimizando la distribución interior y posibilitando una mayor flexibilidad en el diseño de los espacios internos. La adición de una cubierta metálica, caracterizada por su alta estanqueidad, perfecciona y complementa esta estructura, ofreciendo una barrera robusta y efectiva contra las adversidades climáticas.

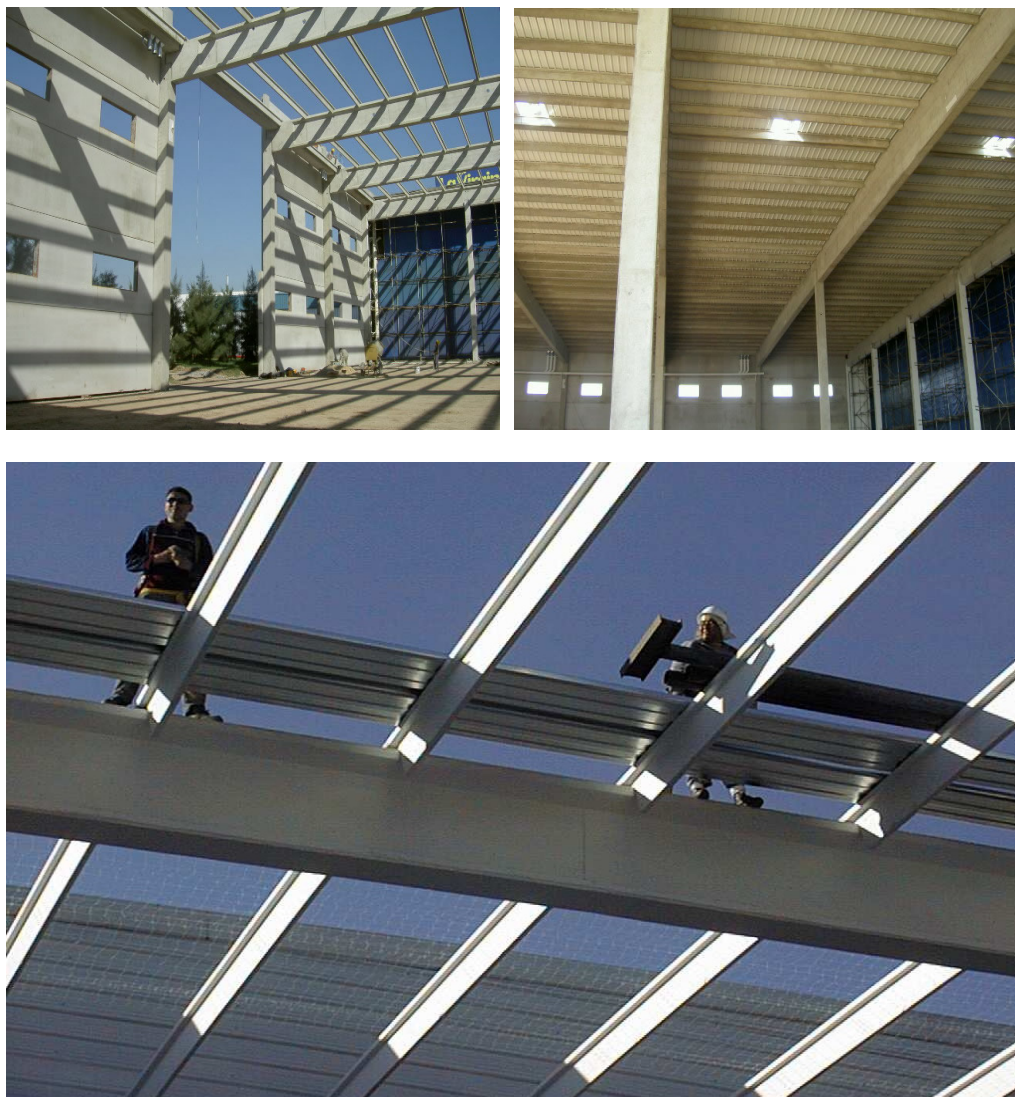


Ilustración 19 – Sistema Mixto. Fuente: Astori Estructuras S.A. (n.d.). Fotografías [Conjunto de fotografías de edificaciones con el sistema mixto]. Recuperado de <https://www.astoriestructuras.com.ar/sistemas/sistema-mixto>.

Más allá de la protección, la estanqueidad de la cubierta metálica (Ilustración 20) también tiene implicaciones sustanciales en la eficiencia energética del edificio. No solo defiende la integridad estructural y funcional del interior de la edificación frente a los elementos externos, sino que también contribuye a mantener un ambiente interno confortable y

energéticamente eficiente, potenciando el bienestar de los ocupantes y reduciendo el consumo energético.

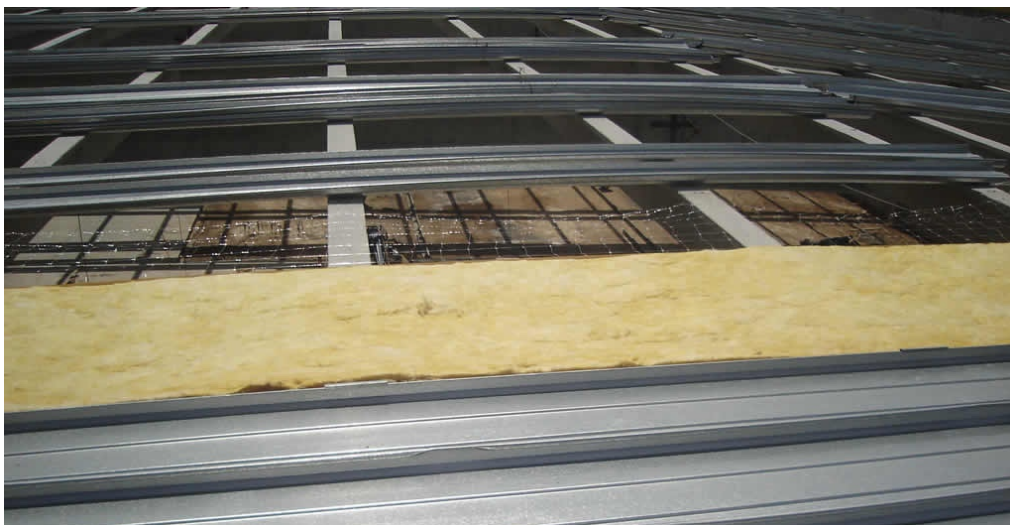


Ilustración 20 – Capas del sistema mixto. Fuente: Astori Estructuras S.A. (n.d.). Fotografía [Fotografía de construcción con el sistema mixto]. Recuperado de <https://www.astoriestructuras.com.ar/sistemas/sistema-mixto>.

Uno de los puntos fuertes del sistema mixto es su adaptabilidad a diferentes modulaciones, que encaja bien con necesidades y visiones arquitectónicas diversas en proyectos variados. La capacidad de ajustar la modulación según los requisitos de cada edificio simplifica el proceso de diseño, y optimiza la eficiencia del sistema constructivo. Sin embargo, la coordinación y la integración de los elementos del H°A° Pretensado y la cubierta metálica requieren una planificación minuciosa y una ejecución precisa.

Las interfaces entre estos componentes deben ser cuidadosamente diseñadas (Ilustración 21) para garantizar la integridad estructural y funcional. Además, la selección adecuada de materiales y técnicas de construcción complementarias resulta esencial para maximizar la sinergia entre los sistemas. La durabilidad y el rendimiento a largo plazo también deben ser evaluados para asegurar que la combinación mantenga su eficacia a lo largo del tiempo.

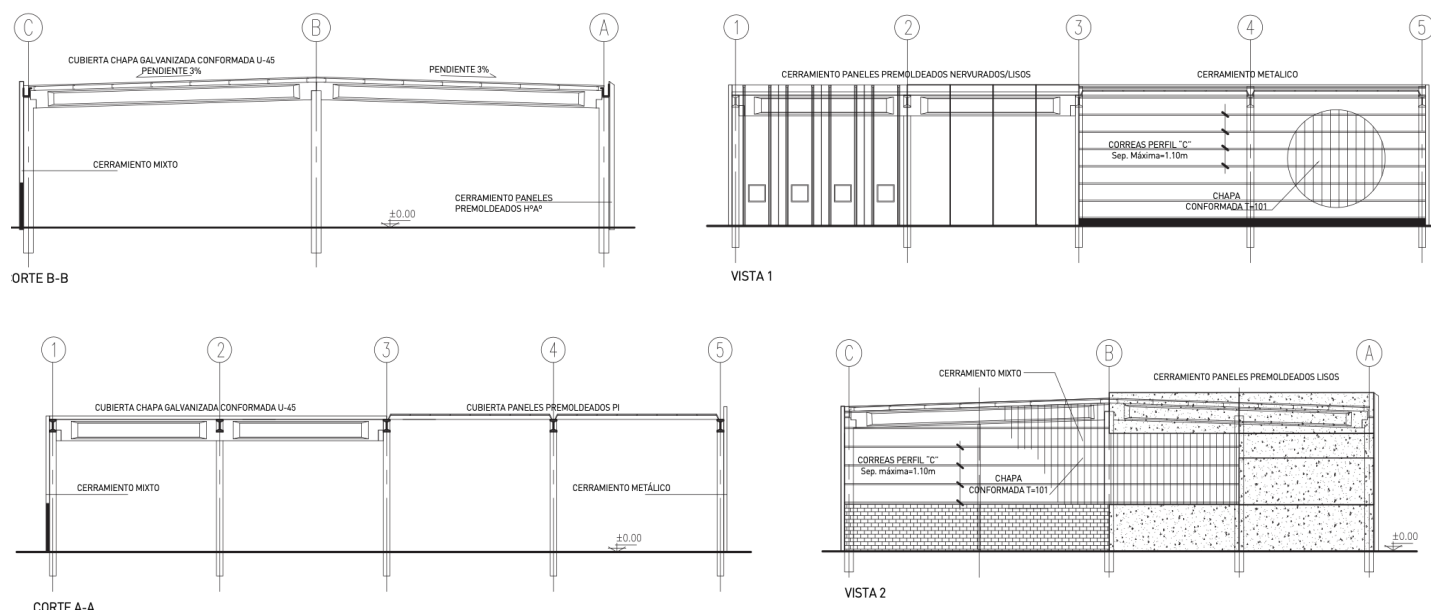


Ilustración 21 – Detalle del sistema mixto. Fuente: Astori Estructuras S.A. (n.d.). Cortes y vistas del sistema mixto [Conjunto de cortes y vistas del sistema]. Recuperado de <https://www.astoriestructuras.com.ar/sistemas/sistema-mixto>.

Sistema Pi

El sistema Pi (Ilustración 22) es un sistema eficiente y versátil, que toma su nombre de la forma en que los componentes se conectan entre sí, similar a la forma de la letra griega Pi.



Ilustración 22 – Sistema Pi. Fuente: Astori Estructuras S.A. (n.d.). Fotografías [Conjunto de fotografías de edificaciones con el sistema Pi]. Recuperado de <https://www.astoriestructuras.com.ar/sistemas/sistema-pi>.

Una característica sobresaliente es su diseño modular, que se basa en la disposición geométrica de elementos – columnas, vigas y losas, diseñados para encajar perfectamente entre sí (Ilustración 23), para permitir una ejecución rápida y precisa. Esta modularidad acelera el proceso de montaje y minimiza la necesidad de ajustes en sitio, reduciendo el margen de error y mejorando la calidad general de la construcción. Las vigas pretensadas (Ilustración 24) son de sección doble Te y su altura es constante para lograr un plano horizontal de apoyo de los paneles.

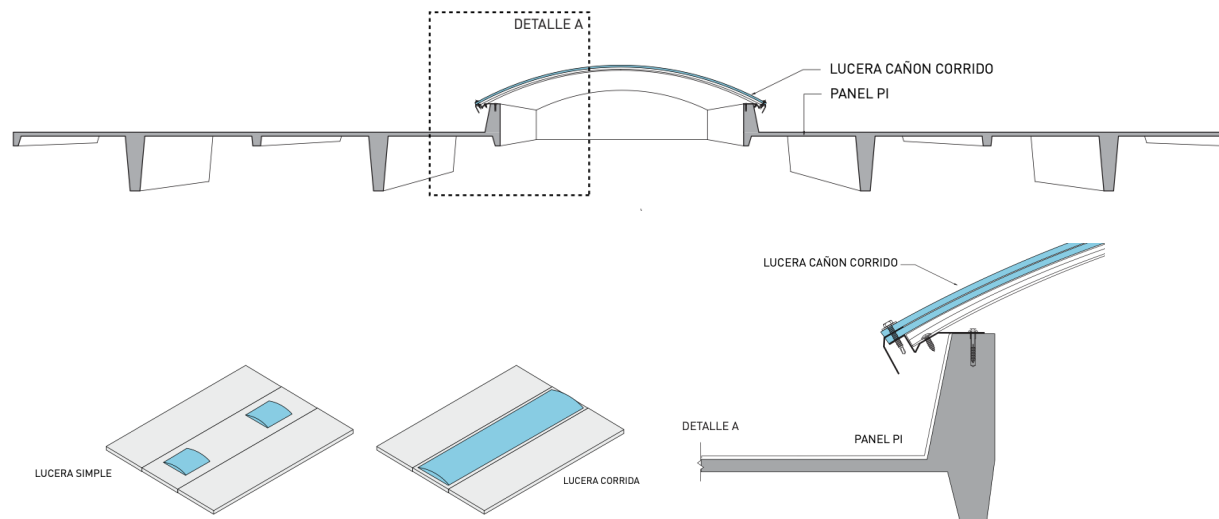


Ilustración 23 – Detalle del sistema Pi. Fuente: Astori Estructuras S.A. (n.d.). Cortes y vistas del sistema Pi [Conjunto de cortes y vistas del sistema]. Recuperado de <https://www.astoriestructuras.com.ar/sistemas/sistema-pi>.

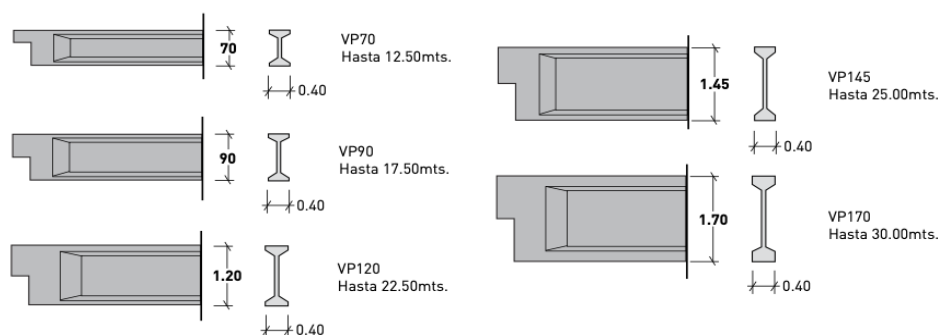


Ilustración 24 – Detalle de las vigas pretensadas del sistema Pi. Fuente: Astori Estructuras S.A. (n.d.). Vistas de las vigas del sistema Pi [Conjunto de vistas de las vigas del sistema]. Recuperado de <https://www.astoriestructuras.com.ar/sistemas/sistema-pi>.

Una de sus ventajas más notables es su capacidad para abordar estructuras complejas y variadas. Al ser modular, se adapta a una amplia gama de geometrías y cargas, en edificios de oficinas, residenciales o industriales. No obstante, la precisión en la fabricación y el montaje son cruciales, ya que cualquier desvío en las dimensiones o alineaciones puede afectar la estabilidad y la duración del edificio.

Sistema Ypsilon

El sistema Ypsilon (Ilustración 25) fusiona la versatilidad de la construcción prefabricada con la eficacia del hormigón armado. Se caracteriza por la manera en la que los componentes se unen, de forma semejante a la letra griega Ypsilon, aplicable desde edificaciones residenciales hasta infraestructuras industriales.



Ilustración 25 – Sistema Ypsilon. Fuente: Astori Estructuras S.A. (n.d.). Fotografías [Conjunto de fotografías de edificaciones con el sistema Ypsilon]. Recuperado de <https://www.astoriestructuras.com.ar/sistemas/sistema-ypsilon>.

La forma de “Y” (Ilustración 26) facilita la integración de elementos verticales y horizontales en una única unidad prefabricada, agiliza el proceso de montaje, reduce los tiempos de construcción y minimiza los riesgos asociados a la ejecución en sitio.

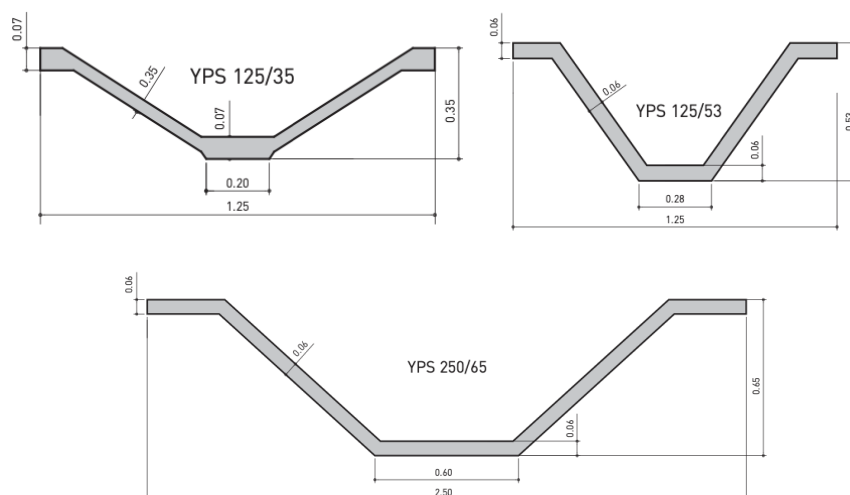


Ilustración 26 – Detalle del sistema Pi. Fuente: Astori Estructuras S.A. (n.d.). Cortes de los elementos del sistema Pi [Conjunto de cortes de los elementos del sistema]. Recuperado de <https://www.astoriestructuras.com.ar/sistemas/sistema-ypsilon>.

El sistema permite ajustarse a geometrías y requerimientos variados (Ilustración 27), buscando maximizar la eficiencia en el uso de materiales y recursos. Para garantizar la integridad estructural y la calidad final del edificio, es fundamental mantener una alta precisión en la fabricación y en el montaje. Este proceso requiere que los profesionales involucrados estén familiarizados con las particularidades del sistema, además de una coordinación eficiente entre los equipos de diseño, fabricación y construcción. Asimismo, una comprensión detallada de las conexiones y los ensamblajes es vital para prevenir errores que puedan afectar la estabilidad y durabilidad del edificio.

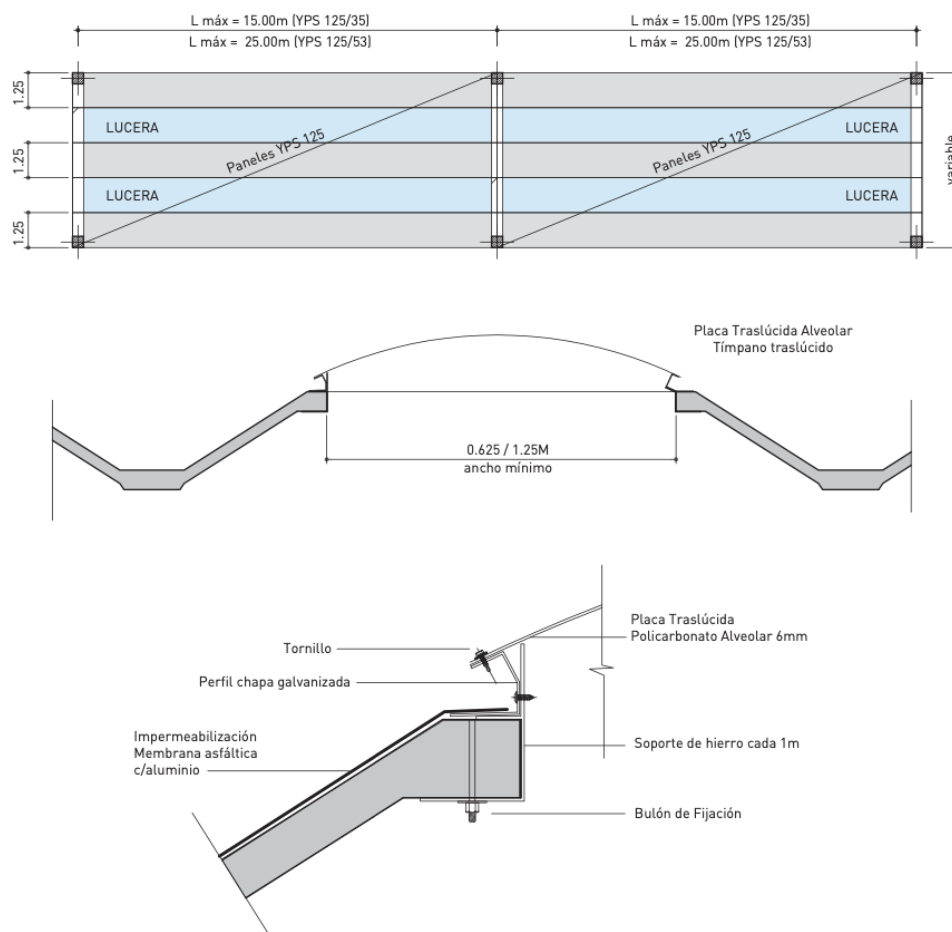


Ilustración 27 – Detalle del sistema Pi. Fuente: Astori Estructuras S.A. (n.d.). Cortes y vistas de los elementos del sistema Pi [Conjunto de cortes y vistas de los elementos del sistema]. Recuperado de <https://www.astoriestructuras.com.ar/sistemas/sistema-ypsilon>.

Reflexiones finales

La exploración de los distintos sistemas y métodos de construcción prefabricada y su análisis comparativo han puesto en evidencia sus respectivas ventajas, limitaciones y campos de aplicación. Los hallazgos revelan la revolución prefabricada como una manifestación tangible del ingenio y la adaptabilidad inherentes a la industria de la construcción, y su capacidad para responder a las demandas en la arquitectura civil. En este contexto, el eje del Río de la Plata, a pesar de las dificultades del contexto latinoamericano, ha emergido como un escenario significativo de estos procesos, en gran parte gracias al impacto nacional e internacional del caso Astori.

Entendido como un sistema de sistemas, hemos examinado los distintos elementos en su individualidad. Esto reveló peculiaridades y especificidades para su posible explotación arquitectónica y facilitó una comprensión sobre la posible convergencia entre el arte y la ciencia en la creación de estructuras que no solo cumplan su función básica sino que desafíen los límites de la estética y funcionalidad arquitectónica. El desglose de estos elementos permite ver cómo cada componente, con su distinción y características, contribuye a la integridad de la estructura total, y cómo la explotación arquitectónica de estos elementos puede diversificar el repertorio de soluciones constructivas disponibles.

A través de esta revisión podemos subrayar el carácter innovador y la capacidad de adaptación de estos sistemas, propiciando una introspección más profunda acerca de las futuras posibilidades y de las vías para la optimización en el ámbito constructivo. Ante este panorama, emergen cuestiones fundamentales: ¿De qué manera la confluencia entre estas tecnologías constructivas y los avances tecnológicos recientes puede redefinir los límites de su incorporación al diseño y la implementación arquitectónica? ¿De qué manera se pueden proporcionar instrumentos que permitan afrontar los desafíos de la

contemporaneidad? Son estos interrogantes los que delinean la próxima etapa de este estudio, subrayando la imperativa necesidad de explorar y entender, desde la academia, cómo las innovaciones emergentes pueden ser instrumentalizadas para enriquecer y revolucionar la AIC.

En la Etapa II, se analiza cómo las recientes innovaciones tecnológicas asociadas a la prefabricación en hormigón pueden integrarse en la práctica de la arquitectura civil para potenciar la eficiencia, el rendimiento y la versatilidad de los sistemas Astori. El objetivo es identificar las sinergias que emergen de esta convergencia, revelando nuevos horizontes en el mundo de la construcción. Asimismo, se pretende comprender y exponer las oportunidades que surgen al implementar innovaciones tecnológicas en los procesos constructivos, buscando mejorar y optimizar soluciones en el ámbito arquitectónico.



ETAPA II

Introducción

La Etapa II afronta la elaboración y perfeccionamiento del MEAP, un modelo que busca responder a demandas contemporáneas en la industria de la construcción. Se funda en un análisis de las más recientes tecnologías y prácticas constructivas y pretende proporcionar un conjunto de criterios y herramientas para evaluar sistemas prefabricados, considerando tanto variables económicas y técnicas como aspectos estéticos y de confort.

Arquitectura civil 4.0 sirve para señalar la transición hacia prácticas más digitalizadas y optimizadas. El BIM y el modelado de conocimiento desempeñan un papel crucial al facilitar la integración de información y la toma de decisiones en el desarrollo del MEAP. Además, recurre a herramientas y metodologías complementarias, como las ontologías, para aportar estructura y claridad al modelo.

Se adopta como enfoque metodológico la DSR, que se caracteriza por su rigor al identificar problemas y diseñar soluciones, facilitando la formulación de soluciones que posteriormente se someten a procedimientos de evaluación y validación. En este marco, se seleccionaron y analizaron cinco estudios de caso que implementan el sistema Astori: (i) el Estadio Multipropósito Parque Roca en Buenos Aires, Argentina; (ii) el Hotel Griffa en Rosario, Argentina; (iii) el Pabellón Verde del Complejo Ferial Córdoba en Córdoba, Argentina; (iv) Finca José Ignacio en Maldonado, Uruguay; y (v) el Costa Urbana Shopping en Ciudad de la Costa, Uruguay. El análisis no solo ha proporcionado datos empíricos de gran valor, directamente relacionados con la adaptabilidad del sistema Astori a proyectos de arquitectura singular con altas demandas estéticas y funcionales, sino que también ha permitido ajustar y perfeccionar el MEAP para asegurar su relevancia y efectividad.

Los resultados derivados de los estudios de caso se alinearon con el marco metodológico DSR, reforzando la precisión y confiabilidad del MEAP. El modelo se sometió a una

evaluación piloto en el Laboratoire de Génie de Production de la École National d'Ingénieurs de Tarbes (ENIT), perteneciente a la Université de Toulouse. Esta fase de validación, sumada a la información de los estudios de caso, confirma la aplicabilidad y pertinencia del MEAP en diversos escenarios de la industria constructiva contemporánea.

Esta Etapa II se despliega en cinco capítulos que delinean el desarrollo, validación y aplicabilidad del MEAP. “Hacia la *arquitectura civil 4.0*” presenta el nuevo escenario y las implicaciones de este nuevo paradigma; “La investigación de la ciencia del diseño” revisa metodologías y enfoques que subyacen en el proceso de diseño y cómo estos influyen en el modelo propuesto; “Hacia un modelo de evaluación” se centra directamente en la construcción conceptual del MEAP, delineando sus componentes, criterios y la lógica inherente al modelo; “Estudios de caso: aplicación y análisis práctico del MEAP” se sumerge en una aplicación real, mostrando cómo el modelo se desempeña en escenarios prácticos y cuál es su relevancia en contextos reales; “Conclusiones: la prueba piloto del MEAP” sintetiza los hallazgos y reflexiones derivados de la aplicación y validación del modelo, culminando con una prueba piloto que valida su aplicabilidad en el campo de la arquitectura prefabricada.

Hacia la *arquitectura civil 4.0*

La revolución industrial, desde la invención de la máquina de vapor hasta la actualidad, ha experimentado varias etapas. Hoy nos encontramos en medio de la cuarta, comúnmente denominada Industria 4.0, que se centra en la fusión de tecnologías digitales, físicas y biológicas. Originada en Alemania alrededor de 2011 durante la Feria de Hannover, se ha propagado rápidamente debido a su capacidad de transformar sectores enteros, incluida la arquitectura y la construcción⁴².

La industria 4.0 ha desencadenado transformaciones significativas en innumerables sectores; no obstante, su implementación en la AIC todavía es incipiente. Esto no se atribuye a una reticencia frente a la innovación, sino más bien a la ausencia de una perspectiva multidisciplinaria que favorezca una aplicación efectiva de las tecnologías, ya exploradas y probadas en otros campos del conocimiento.

Esta investigación explora la “*arquitectura civil 4.0*”, un término, concebido y desarrollado en el curso de este estudio para representar la simbiosis entre la construcción prefabricada en hormigón y las tecnologías digitales. Se propone evaluar cómo la metodología BIM, las ontologías y el modelado de conocimiento pueden incorporarse al campo de la arquitectura civil para abordar desafíos contemporáneos y futuros en el diseño, montaje y uso de edificaciones de manera más eficaz y eficiente. A través de este prisma, la industria de la construcción tiene la oportunidad de capitalizar tecnologías emergentes que ya han revolucionado otras disciplinas, abriendo nuevos caminos y posibilidades para el sector.

La *arquitectura civil 4.0* pretende unificar los mundos de la construcción y la tecnología digital bajo un mismo paraguas, donde las ventajas de la digitalización y la automatización puedan

⁴² (Müller, Dotzauer, & Voigt, 2018). *Industry 4.0 and its impact on reshoring decisions of German manufacturing enterprises*. Journal of Manufacturing Technology Management.

ser aplicadas de manera efectiva y rentable en el diseño y la construcción. La noción subyacente es que, al combinar la sofisticación técnica de los métodos modernos de construcción prefabricada en hormigón con las capacidades de las tecnologías digitales, podemos alcanzar una nueva era de precisión y sostenibilidad en la construcción, mejorando la toma de decisiones en todas las etapas del ciclo, desde el diseño y la planificación hasta la ejecución y el mantenimiento.

La evolución hacia la *arquitectura civil 4.0* no puede ser vista únicamente como una incorporación de nuevas tecnologías al sector constructivo. En realidad, supone una profunda transformación de cómo concebimos, diseñamos y construimos en el siglo XXI, que demanda la consideración de nuestras herramientas y nuestros métodos y enfoques tradicionales. Su esencia es la integración de múltiples componentes: un enfoque colaborativo y multidisciplinario que considere cada etapa del ciclo de vida de las construcciones, la selección adecuada de materiales y la implementación de tecnologías innovadoras y de técnicas de construcción avanzadas. Todo esto, con un énfasis constante en la sostenibilidad y la optimización de recursos.

No obstante, surge una cuestión fundamental: ¿cómo diseñar un proceso que unifique estos componentes y áreas de conocimiento? Al detectar la complejidad de fusionar estos aspectos y campos, el panorama despertó un interés investigativo.

Inicialmente, la investigación se inclinaba hacia la creación de un instructivo que proporcionara recomendaciones técnicas, formales, funcionales y ambientales para el sistema constructivo prefabricado. Sin embargo, al profundizar en la evaluación de estos sistemas, surgieron vacíos y ambigüedades que requerían una atención especial. Por ejemplo, había un déficit en cómo se consideraban las variables ambientales en relación con los aspectos técnicos, ambigüedades en las métricas de evaluación de eficiencia y falta de criterios para medir la adaptabilidad y versatilidad de los sistemas en distintos contextos.

Se constató que las herramientas y métodos tradicionales no resultaban adecuados para abordar la complejidad inherente a los sistemas prefabricados, que, aunque estos proponían soluciones prometedoras en cuanto a eficiencia y minimización de residuos, no contaban con un marco concreto que permitiese evaluar su desempeño en términos reales, abarcando tanto el diseño como la ejecución. Esta constatación condujo a una exploración interdisciplinaria en busca de metodologías y herramientas que ofrecieran una visión más global, centrada en una evaluación integral de los sistemas en cuestión.

En este contexto, se reconoció la necesidad de investigar en campos académicos adicionales, y se retomó una colaboración previamente establecida en 2014 con el Dr. Bernard Kamsu Foguem, afiliado al Laboratoire de Génie de Production de la École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes de la Université de Toulouse, quien ya había estado investigando la aplicación del BIM en el sector de la AIC.

De estas discusiones, se identificaron métodos e instrumentos pertenecientes a la ingeniería de producción, la ingeniería de sistemas y los sistemas de información que podrían ser relevantes para el desarrollo de una metodología de evaluación. Estas disciplinas ofrecían abordajes específicos para gestionar y analizar sistemas complejos, y su aplicación en el contexto de la arquitectura prefabricada prometía una evaluación más completa y rigurosa. La aplicación de estas herramientas ofreció nuevas perspectivas y abordajes que enriquecieron el proceso investigativo. Sin embargo, aun con este arsenal de nuevas metodologías, se hizo evidente que se requería algo más estructurado y específico para la industria de la AIC. Se evidenció la necesidad de contar con un sistema evaluativo capaz de consolidar todas estas dimensiones en un formato práctico y aplicable.

Fue en el contexto de una clase en el curso de “Producción edilicia I” en la Facultad de Arquitectura Planeamiento Urbano y Diseño de la Universidad Nacional de Rosario, en la que actuaba como adscripta a la docencia, cuando emergió de forma palpable la necesidad

de un marco evaluativo. Las preguntas eran innumerables: ¿Cómo medimos la eficiencia de este proceso? ¿Dónde están las áreas de mejora? ¿Estamos realmente maximizando la sostenibilidad y eficiencia que la prefabricación promete?

Ante estas inquietudes, surgió la necesidad de desarrollar un método de evaluación específico para este enfoque constructivo. Esta idea evolucionó y, tras un exhaustivo trabajo de investigación y colaboración con expertos en diversos campos, nació el MEAP: un marco estructurado que permite evaluar de manera integral los procesos de construcción prefabricados. Se originó a partir de diálogos con profesionales de la industria, análisis de proyectos actuales y reconocimiento de las ineficiencias y obstáculos que se presentaban cotidianamente.

Así es como el MEAP se presenta como una hoja de ruta práctica y aplicable hacia la *arquitectura civil 4.0*. Es, en esencia, una propuesta para construir de manera más inteligente, sostenible y colaborativa en un mundo cada vez más interconectado y consciente de sus desafíos medioambientales. Proporciona las herramientas y el conocimiento esencial para enfrentar los retos contemporáneos; también allana el camino para una profunda reflexión sobre cómo lo digital y lo tangible se entrelazan en la industria de la construcción, un diálogo que se explora con profundidad en el próximo capítulo.

La convergencia poética de lo digital y lo concreto

La convergencia poética de lo digital y lo concreto abre una travesía minuciosa y exploratoria por el universo de las tecnologías digitales y la materialidad intrínseca de la arquitectura y la construcción. El término “concreto” en el título de este capítulo, además de referirse a la realidad tangible, hace también un juego de palabras con el material “concreto” (o “hormigón” en español), utilizado en los sistemas de construcción prefabricados, los cuales son un aspecto clave de la *arquitectura civil 4.0* explorada en esta tesis. Esta doble significación pone de relieve el interés de la investigación en la fusión de los mundos digital y material en el ámbito de la arquitectura y la construcción, capaz de crear un espacio de innovación y cambio, donde la tecnología y la arquitectura interactúan para transformar la forma en que se diseñan, construyen y comprenden los entornos construidos. Aquí, las fronteras entre la teoría y la práctica, el diseño y la construcción, y lo digital y lo físico se vuelven permeables, abriendo nuevas posibilidades y desafíos.

La revolución digital, impulsada por avances en informática, software y conectividad, ha abierto nuevas formas de trabajar y pensar en muchos campos. Estos avances ofrecen herramientas poderosas para la visualización, la colaboración y la producción, y tienen el potencial de cambiar radicalmente el proceso de diseño y construcción. A pesar de todas las oportunidades que estas tecnologías presentan, también existen desafíos. La adopción de estas tecnologías requiere cambios significativos en la forma en que trabajamos y pensamos. Exige una nueva forma de pensar que integre lo digital y lo concreto, lo teórico y lo práctico.

Este capítulo se adentra en algunas de estas nuevas tecnologías, en particular el BIM, las ontologías y el modelado del conocimiento. Examinamos cómo estas tecnologías fueron utilizadas para optimizar los sistemas prefabricados, más específicamente en qué aspectos

estas tecnologías contribuyeron para la elaboración del MEAP. También discutiremos los desafíos y oportunidades asociados con la adopción de estas tecnologías en la industria de la construcción.

BIM: la transformación digital para el desarrollo del MEAP

La metodología BIM se ha convertido en una herramienta cada vez más importante en la industria de la construcción. Esta metodología permite la creación de un modelo digital en 3D de un proyecto (Ilustración 28), que contiene información detallada sobre los elementos constructivos, materiales, sistemas, etc. Esta información puede ser compartida entre todos los agentes involucrados en el proyecto, lo que facilita la coordinación y la colaboración.

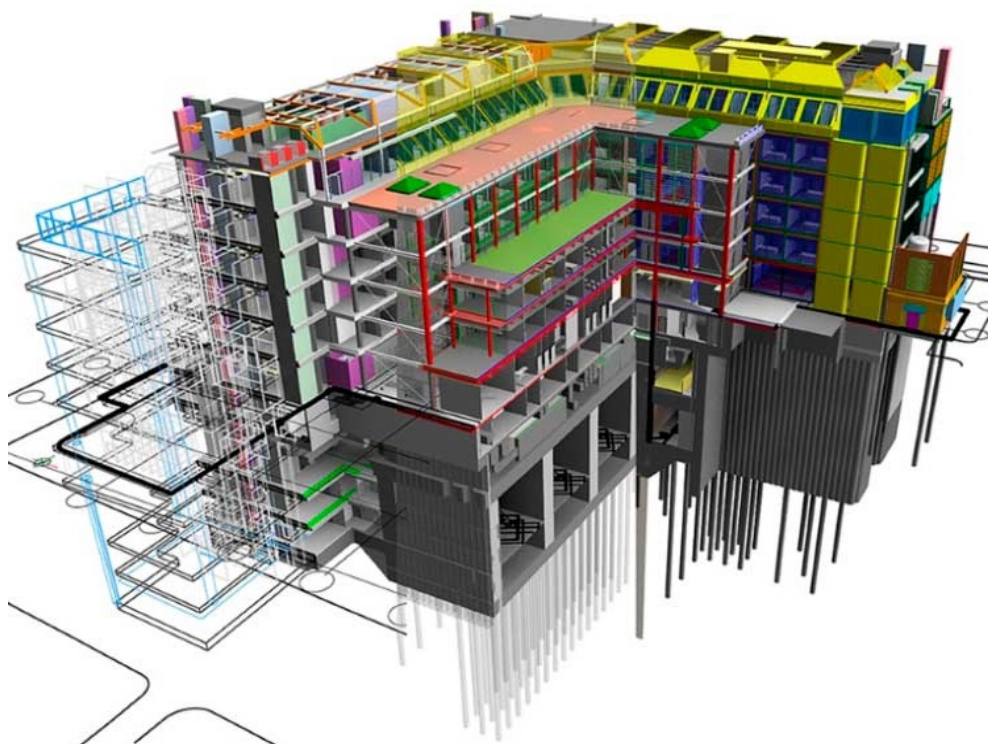


Ilustración 28 – Ejemplo de edificación presentando los datos de la metodología BIM. [Modelo elaborado en el software Revit por Hunter Douglas Architectural]. Recuperado de <https://architectural.hunterdouglas.com.co/articulo/bim-la-nueva-tecnologa-en-construccion>.

Recientemente, la investigación en torno al BIM ha ganado notoriedad. Abarcan desde la aplicación de BIM en proyectos constructivos, pasando por su aporte en la administración de proyectos, hasta el análisis del retorno de inversión derivado de su implementación. Su auge es incontestable y su relevancia se refleja en una serie de estudios clave que buscan analizar su impacto y potencial. Eastman et al. (2011)⁴³, en su “BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers, and contractors”, no solo destacan la versatilidad de la metodología para distintos actores involucrados en el proceso constructivo, sino su papel transformador. La profundidad del manual refleja el compromiso de los autores con la promoción de una adopción efectiva del BIM.

Por otro lado, Arayici et al. (2011)⁴⁴, en “Technology adoption in the BIM implementation for lean architectural practice”, se sumergen en el proceso de adopción tecnológica relacionada con el BIM, subrayando su influencia en la optimización de la práctica arquitectónica. Su estudio evidencia cómo la integración del BIM puede conllevar a prácticas de trabajo más enjutas y eficientes, aunque sugiere también la necesidad de abordar ciertos desafíos para su adopción plena.

Sacks et al. (2010)⁴⁵ en su artículo “Requirements for developing and implementing prefabrication”, exploran las necesidades esenciales para el desarrollo y la implementación de la prefabricación. Si bien no se centran únicamente en BIM, su análisis proporciona un marco que resalta la importancia de las metodologías digitales en la facilitación de procesos prefabricados.

⁴³ (Eastman C. , Teicholz, Sacks, & Liston, 2011). *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers, and contractors*. John Wiley & Sons.

⁴⁴ (Arayici, et al., 2011). *Technology adoption in the BIM implementation for lean architectural practice*. Automation in Construction. 189-195.

⁴⁵ (Sacks, Barak, Eastman, & Lee, 2010). *Requirements for developing and implementing prefabrication*. Journal of architectural engineering. 67-73.

Esta confluencia de investigaciones y discusiones sobre BIM y la prefabricación proporciona una plataforma desde la cual el MEAP pueda desarrollarse y evolucionar. Sin embargo, la pregunta clave es: ¿Cómo posicionar al MEAP en este paisaje en evolución y cómo abordar los desafíos actuales de la industria de la construcción?

La guía de Eastman et al. (2011)⁴⁶, si bien resalta la capacidad transformadora del BIM en el sector, plantea desafíos que conlleva su adopción. Uno de los mayores obstáculos son las barreras tradicionales en la construcción, la falta de colaboración y la resistencia al cambio. En este contexto, el MEAP, al incorporar la metodología BIM, no solo busca abordar la construcción desde una perspectiva técnica, sino también organizativa y colaborativa.

Arayici et al. (2011)⁴⁷ nos recuerdan que, si bien la tecnología puede ofrecer herramientas avanzadas, su éxito en la práctica arquitectónica requiere cambios significativos en la forma en que se trabaja. Se refieren a una cultura de trabajo que valore la innovación, la adaptabilidad y la colaboración. En este sentido, el MEAP no solo adopta tecnologías emergentes, sino que fomenta una cultura de trabajo intrínsecamente colaborativa y adaptable.

La cuestión está en aplicar prácticamente estas tecnologías en la construcción. Aquí es donde el trabajo de Sacks et al. (2010)⁴⁸ es relevante. La intersección del BIM con la prefabricación, como señalan, podría llevar a la industria a nuevos horizontes de eficiencia y precisión. El MEAP toma nota de esto, proponiendo soluciones que no solo se centran en el diseño, sino en toda la cadena de valor de la construcción. La idea es que cada pieza,

⁴⁶ (Eastman C. , Teicholz, Sacks, & Liston, 2011). *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers, and contractors*. John Wiley & Sons.

⁴⁷ (Arayici, et al., 2011). *Technology adoption in the BIM implementation for lean architectural practice*. Automation in Construction. 189-195.

⁴⁸ (Arayici, et al., 2011). *Technology adoption in the BIM implementation for lean architectural practice*. Automation in Construction. 189-195.

cada proceso, esté informado por datos precisos y actualizados, optimizando recursos y reduciendo residuos.

Dicho todo esto, se vuelve evidente que el BIM no es solo una herramienta, sino un cambio paradigmático en la forma de enfrentar la construcción civil. Sin embargo, poseer una herramienta tan potente plantea un nuevo interrogante: ¿cómo maximizar su potencial extrayendo y utilizando eficazmente la información que proporciona? La incorporación adecuada de datos y su gestión resultan fundamentales en la eficiencia de cualquier proyecto.

¿Como utilizar los datos del modelo BIM?

Responder a esta pregunta es esencial para comprender el potencial y la revolución que el BIM puede introducir en la industria de la construcción. Los datos del BIM no son solo registros pasivos; son piezas activas de información que, cuando se utilizan correctamente, pueden transformar la forma en que se llevan a cabo las construcciones.

Tras una meticulosa investigación y análisis de múltiples aspectos del sector constructivo y arquitectónico, se detectaron diversas formas de aprovechar las informaciones del modelo BIM de manera óptima. Las necesidades actuales, caracterizadas por precisiones milimétricas y la optimización de recursos, han impulsado la adopción de soluciones avanzadas. Además, la complejidad de proyectos que involucran a múltiples partes interesadas, desde arquitectos hasta inversores, exige herramientas que permitan una coordinación fluida y reduzcan malentendidos, papel que el BIM desempeña eficientemente.

Paralelamente, la creciente conciencia sobre los impactos ambientales de la construcción motiva la búsqueda de herramientas que puedan contribuir al diseño de edificios más

sostenibles y eficientes. El BIM, en sintonía con esta tendencia, facilita el diseño y la gestión sostenibles. Los avances tecnológicos, como la integración de BIM con la inteligencia artificial y la realidad aumentada y virtual, amplían aún más las posibilidades de esta herramienta, optimizando su potencial en variados escenarios.

Por otro lado, en el cambiante panorama de la construcción, donde los proyectos a menudo enfrentan imprevistos, el BIM emerge como una solución flexible que se adapta a estos cambios, garantizando respuestas ágiles y precisas. Además, la valiosa retroalimentación obtenida directamente de los profesionales del sector durante la investigación proporcionó una dirección clara sobre cómo estaban utilizando el BIM y cuáles eran sus expectativas y necesidades. Esta interacción, junto con el análisis de estudios y proyectos anteriores que habían implementado BIM con éxito, ayudó a identificar prácticas y enfoques efectivos.

La utilización óptima de los datos del modelo BIM se presenta como un desafío inherente al dinamismo y complejidad del sector constructivo. Basándonos en las entrevistas con expertos del campo y en proyectos anteriores, fue posible identificar enfoques y prácticas para maximizar su aprovechamiento.

Primero, es fundamental comprender que el BIM va más allá de la mera representación gráfica. Contiene una vasta cantidad de datos detallados que abarcan desde los materiales utilizados hasta las técnicas constructivas previstas. Para utilizar estos datos eficientemente, se requiere de un software adecuado que permita extraer, analizar y presentar la información de manera coherente y contextualizada. Esto no solo facilita el proceso de diseño, sino también la toma de decisiones en todas las fases del proyecto.

En esta investigación, se optó por el ArchiCAD⁴⁹ como el software principal debido al sistema operativo de la computadora utilizada, que es MacOS. El ArchiCAD, desarrollado por Graphisoft, destaca por su capacidad para gestionar y manipular grandes volúmenes de datos inherentes a los modelos BIM de manera eficiente. La extracción de datos en ArchiCAD se realiza a través de su funcionalidad “Extra de Listados” (Ilustración 29), que permite generar informes detallados basados en los elementos del modelo. Estos informes pueden incluir una variedad de datos, desde materiales y dimensiones hasta costos y especificaciones técnicas. Dicha herramienta facilita la obtención de información precisa y relevante que puede ser esencial para el proceso de toma de decisiones en las distintas fases de un proyecto.

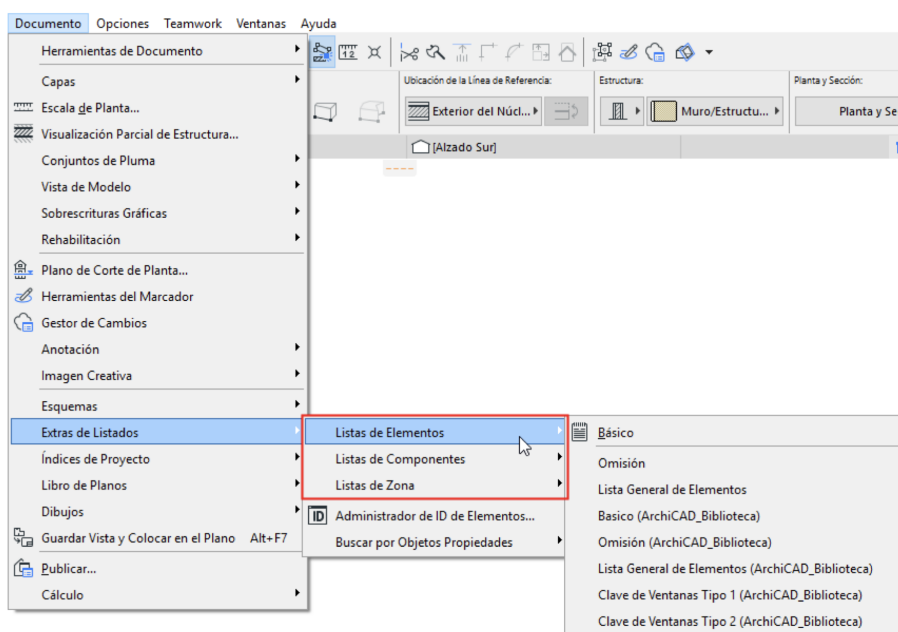


Ilustración 29 – Como extraer listas de elementos, componentes y zonas del modelo en ArchiCad. [Entorno de trabajo del software ArchiCad]. Fuente: ArchiCad.

⁴⁹ Es un software de diseño arquitectónico basado en el modelo BIM (Building Information Modeling) desarrollado por la empresa húngara Graphisoft. Desde su aparición en 1984, ArchiCAD ha sido uno de los principales programas de arquitectura utilizados en el diseño y modelado de edificaciones. Su capacidad para funcionar en sistemas operativos MAC, además de Windows, y su interfaz intuitiva, lo han consolidado como una herramienta de preferencia para muchos arquitectos y diseñadores alrededor del mundo. Además de las funcionalidades tradicionales del BIM, ArchiCAD ofrece integraciones con otras herramientas y plataformas, permitiendo un trabajo colaborativo y multidisciplinario en proyectos de construcción.

Una vez extraídos, estos datos pueden ser analizados, comparados y visualizados de diversas formas, lo que facilita la comprensión del proyecto en su totalidad y permite identificar áreas de mejora, optimización o corrección.

En la fase de diseño, los datos BIM pueden ser utilizados para realizar simulaciones detalladas, permitiendo anticipar y resolver problemas potenciales. Para realizarlas, es fundamental contar con un modelo bien estructurado y detallado. Los siguientes aspectos explican cómo estos datos pueden ser utilizados en simulaciones:

1. **Simulación Energética:** El BIM contiene información sobre los materiales, orientación, geolocalización y características del edificio. Estos datos pueden alimentar softwares de simulación energética para prever el consumo energético del edificio, identificar potenciales puntos de pérdida de energía y proponer soluciones para mejorar la eficiencia energética.
2. **Simulación Lumínica:** A través de la geometría del modelo y las características de los materiales, es posible simular el comportamiento de la luz natural en el espacio, permitiendo diseñar ambientes más confortables y reduciendo la necesidad de iluminación artificial.
3. **Simulación Acústica:** El BIM permite simular el comportamiento acústico de un espacio basándose en las propiedades de los materiales y la configuración del espacio, esencial para espacios como auditorios o aulas.
4. **Simulaciones Hidráulicas y de Ventilación:** El modelo BIM ofrece información detallada de las redes hidráulicas y sistemas de ventilación, permitiendo simular el comportamiento y eficiencia de estos sistemas, anticipando posibles fallos o ineficiencias.

5. **Simulación de Escenarios de Evacuación:** En caso de emergencias, el modelo BIM puede ser utilizado para simular rutas de evacuación, identificando posibles cuellos de botella o áreas de riesgo.
6. **Integración con Realidad Virtual o Aumentada:** El BIM permite la creación de ambientes inmersivos donde los agentes de la construcción pueden “caminar” por el edificio antes de su construcción, ofreciendo una herramienta poderosa para toma de decisiones y correcciones en diseño.

Al proporcionar una visión anticipada de estos aspectos, es posible ajustar el diseño antes de que comience la fase de construcción, lo que evita retrasos y costos adicionales. Además, en la fase de construcción, los datos del BIM pueden ser usados para coordinar eficientemente los trabajos en el sitio. Esto es especialmente relevante cuando se involucran múltiples contratistas y especialistas, ya que asegura que todos trabajen con la misma información actualizada, evitando conflictos y malentendidos.

Otra aplicación crucial de los datos del BIM se encuentra en la gestión de instalaciones y el mantenimiento del edificio una vez finalizada la construcción. Aquí, la información detallada sobre los sistemas instalados y los materiales utilizados puede facilitar significativamente las operaciones de mantenimiento, permitiendo anticipar necesidades y planificar intervenciones de manera más eficiente.

Finalmente, es esencial enfocar la formación y capacitación continua de los profesionales involucrados. Los datos del BIM, por muy detallados y completos que sean, solo resultan útiles si hay expertos capaces de interpretarlos y aplicarlos de manera adecuada. Por ello, las inversiones en formación y la actualización constante de las competencias del equipo son vitales para sacar el máximo provecho del potencial que ofrece el BIM.

En el ámbito del objeto central de esta tesis, los sistemas constructivos prefabricados en hormigón, el BIM se erige como una herramienta fundamental para enfrentar los desafíos inherentes a estos sistemas. Dado que los componentes prefabricados se producen fuera del sitio de construcción y luego se ensamblan en el lugar, la precisión en el diseño y la coordinación durante el proceso de ensamblaje son esenciales. El BIM, al proporcionar una representación dinámica y paramétrica de cada elemento del proyecto, garantiza esta precisión y coordinación. El detallado contenido en el BIM asegura que cada componente se ajuste a la perfección, eliminando así la posibilidad de errores costosos y retrasos.

En términos de logística y planificación, el BIM proporciona una visión clara de cómo cada pieza prefabricada de hormigón se integrará en el lugar, ofreciendo guías claras para la instalación y garantizando una ejecución fluida. Al considerar la integración de los componentes prefabricados con otros elementos estructurales o instalaciones, como las eléctricas o hidráulicas, el BIM se convierte en una herramienta indispensable para evitar conflictos y superposiciones.

Para finalizar, es necesario resaltar la importancia de una visión integrada en la construcción. Utilizar herramientas como el BIM es solo una parte del proceso. La verdadera eficiencia surge cuando se realiza un análisis completo y se simulan todos sus aspectos para obtener una información detallada que permita tomar decisiones más efectiva para la integración de sistemas constructivos prefabricados en hormigón en proyectos de arquitectura civil.

Modelado del conocimiento: forjando la base del MEAP

En relación con la estructura avanzada del BIM, el modelado de conocimiento resulta esencial. Si bien BIM proporciona una representación rica y detallada de los proyectos en

forma de datos, el modelado de conocimiento se encarga de que estos datos no solo se almacenen, sino que se interpreten, se conecten y se utilicen de manera efectiva. Es una forma de garantizar que la información procedente de los modelos BIM se traduzca en conocimientos aplicables y contextuales para que los proyectos sean técnicamente robustos y adecuados a las circunstancias y desafíos específicos de cada situación.

El modelado del conocimiento es una disciplina que se centra en la estructuración y organización de la información para facilitar el entendimiento y la toma de decisiones. En la industria de la construcción, el modelado del conocimiento se convierte en una herramienta esencial para gestionar y explotar de manera efectiva los vastos volúmenes de datos que se generan durante el ciclo de vida de un proyecto de construcción.

En el contexto de la creación del MEAP, la profundidad del modelado de conocimiento reside en su capacidad para traducir los vastos datos del modelo BIM en información utilizable, proporcionando una guía esencial para desentrañar los complejos procesos y sistemas que intervienen en la construcción. No se trata solo de almacenar datos, sino de entenderlos y contextualizarlos. A través de modelos de conocimiento específicos como ontologías, taxonomías y lógicas descriptivas, se puede representar la semántica y la estructura de la información de la construcción. Estos modelos permiten identificar relaciones complejas entre los elementos, procesos y otros aspectos inherentes a un proyecto de construcción.

Por ejemplo, en el contexto de los sistemas constructivos prefabricados en hormigón, un modelo de conocimiento puede representar las relaciones entre diferentes componentes del sistema, los procesos de montaje, los parámetros de rendimiento, y las interacciones con otros sistemas del edificio. Esto permite una planificación más detallada, identificando potenciales problemas o ineficiencias antes de que surjan en el proceso real de

construcción. Esta perspectiva enriquecida, a su vez, prepara el terreno para decisiones de diseño y construcción más informadas y efectivas.

Uno de los principales beneficios del modelado del conocimiento es su capacidad para mejorar la eficiencia y precisión en el proceso de construcción. Al representar de forma clara y estructurada los diversos componentes y procesos, se facilita la identificación y resolución de problemas potenciales antes de que se materialicen. Esto puede resultar en una reducción de los costos y el tiempo de construcción, así como en una mejora en la calidad del edificio terminado. Además, puede contribuir a mejorar la sostenibilidad y la eficiencia energética de los edificios. Mediante la representación detallada de los materiales y sistemas utilizados, y la simulación de su comportamiento y rendimiento, se pueden identificar oportunidades para optimizar el uso de recursos y reducir el impacto ambiental de los edificios. También puede proporcionar un marco para analizar y evaluar diferentes opciones, desde la selección de materiales hasta la planificación de la construcción y el mantenimiento, lo que puede resultar en decisiones más informadas y efectivas.

En términos de colaboración y comunicación, el modelado del conocimiento también puede tener un impacto positivo, ya que proporciona una representación compartida y comprensible del proyecto que facilita el intercambio de ideas y la resolución de problemas, mejorando la coordinación durante la construcción. Mediante esta representación estructurada y coherente de los elementos y procesos, tiene un papel crucial en la creación del MEAP.

Ontologías: el lenguaje esencial en la elaboración del MEAP

En el ámbito de esta tesis, se destaca la relevancia de las ontologías como modelo de conocimiento específico para traducir los vastos datos del modelo BIM en información

contextualizada y utilizable. Las ontologías, que son representaciones estructuradas de un conjunto de conceptos y las relaciones entre esos conceptos, ofrecen un mecanismo para capturar la esencia semántica y las interconexiones inherentes a los proyectos de construcción. Proporcionan un marco conceptual y unificado para la representación y el intercambio de información. Se trata de un esquema de representación del conocimiento que define de manera estandarizada las entidades, las relaciones y las reglas dentro de un dominio específico.

En la era digital, las ontologías demuestran ser una herramienta poderosa para manejar la complejidad inherente a la industria de la construcción. En el contexto de los sistemas constructivos prefabricados en hormigón, una ontología puede representar las relaciones entre diferentes componentes del sistema, los procesos de montaje, los parámetros de rendimiento y las interacciones con otros sistemas del edificio. A través de este enfoque, es posible realizar una planificación más meticulosa, anticipando potenciales problemas o ineficiencias. Al integrar las ontologías con el BIM, la tesis propone una comprensión más profunda y rica de los proyectos, trascendiendo lo meramente visual o geométrico para sumergirse en el significado y las interrelaciones que los datos encierran.

Una de las ventajas de las ontologías es su capacidad para potenciar la interoperabilidad de datos. Dada la naturaleza multidisciplinaria de la construcción, surge la necesidad de compartir y comprender datos provenientes de diversas disciplinas y fuentes. Las ontologías facilitan este intercambio de manera coherente y significativa, asegurando una interpretación uniforme de la información entre todos los actores involucrados, lo que promueve una colaboración y coordinación efectivas. Son vitales para la gestión y organización de grandes volúmenes de datos, proporcionando una forma de clasificar y organizar la información que facilita la búsqueda y recuperación de datos. Esto es particularmente útil en el contexto de los sistemas prefabricados, donde se requiere un

manejo cuidadoso de los detalles de los componentes y procesos de construcción. Además, posibilitan un diseño más preciso, no solo elevando la calidad del producto final, sino también conllevando significativos ahorros en costos y tiempo.

Este abordaje juega un papel importante en la sostenibilidad de los edificios. Al almacenar información detallada sobre los materiales y sistemas utilizados, pueden facilitar la evaluación y optimización del rendimiento energético, llevar a la elección de materiales y sistemas más sostenibles y eficientes, y reducir así el impacto ambiental de los edificios.

Además, las ontologías pueden mejorar la toma de decisiones en todas las etapas de la construcción. Al proporcionar una visión clara y detallada, pueden ayudar a los actores involucrados a tomar decisiones informadas, desde la selección de materiales hasta la planificación de la construcción y el mantenimiento, resultando en un proceso de construcción más suave y eficiente, con menos errores y retrasos.

Integrando todo lo expuesto, el MEAP se beneficia del uso de ontologías en relación con el BIM; aprovecha sus capacidades para facilitar la interoperabilidad, gestionar grandes volúmenes de datos y optimizar la toma de decisiones.

La investigación de la ciencia del diseño

En los capítulos previos, se ha establecido un marco contextual que aborda la integración de lo digital con lo tangible en el ámbito de la Arquitectura, Ingeniería y Construcción (AIC). Esta convergencia nos dirige hacia una exploración más profunda: la investigación en la ciencia del diseño, sin limitarnos a la creación per se, sino adentrándonos en el análisis y comprensión de los procesos y metodologías que conforman el diseño.

La ciencia del diseño examina, con rigor y metodología, los procedimientos que subyacen a nuestras intervenciones proyectuales, considerando tanto las herramientas tecnológicas actuales como los principios clásicos que han fundamentado la actividad arquitectónica y constructiva. En este contexto, la DSR se presenta como una subdisciplina que no solo busca comprender los fenómenos asociados al diseño, sino que aspira a crear innovaciones pragmáticas y viables para enfrentar problemas específicos.

DSR como respuesta metodológica

En el horizonte de la búsqueda de soluciones innovadoras en la industria de la construcción, la DSR se erige como marco para guiar el desarrollo del MEAP. Se trata de un enfoque riguroso que busca resolver problemas complejos a través del diseño, el desarrollo y la evaluación de soluciones concretas y aplicables.

En el contexto del MEAP, proporciona una estructura coherente para abordar los desafíos multifacéticos asociados con la evaluación de sistemas constructivos prefabricados, enfatizando la creación de conocimiento práctico y tangible y comprometiéndose con la solución de problemas del mundo real. El MEAP, como herramienta de evaluación y optimización, es el resultado palpable de la aplicación disciplinada de los principios de la DSR.

Uno de los aspectos cruciales de la DSR es su naturaleza iterativa. A lo largo del proceso de desarrollo del MEAP, se llevaron a cabo múltiples iteraciones para refinar y mejorar la metodología en función de la retroalimentación y los hallazgos obtenidos en cada etapa. Esto aseguró que el MEAP evolucionara y se adaptara para abordar las complejidades identificadas en este campo de interacción entre la industria de prefabricados y las demandas de los profesionales.

La DSR también promovió la colaboración interdisciplinaria y la inclusión de la colaboración de expertos y profesionales relevantes. En el caso del MEAP, permitió incorporar diversos puntos de vista de los arquitectos de los casos analizados, personal técnico gerencial de Astori y de científicos especializados para formular y perfeccionar el método. Las discusiones y entrevistas con expertos en el campo de la construcción y la arquitectura - Pedro Soria, Rodrigo Argañarás, José Luis Pertusso, Ricardo Sargiotti, Philippe Fillatreau y Henry Abanda – resultaron fundamentales para la validación y mejora continua del MEAP.

En el desarrollo del MEAP se siguieron meticulosamente cinco etapas. La primera, la identificación del problema, se enfocó en entender los problemas propios de la arquitectura prefabricada en su interacción con la arquitectura civil mediante un análisis profundo. Luego, en la creación de soluciones, se materializaron ideas y conceptos en una solución tangible y funcional, creando prototipos iniciales del MEAP y refinándolos mediante pruebas iterativas. Durante la evaluación, se realizó un análisis del rendimiento y aplicabilidad del MEAP, proporcionando insights sobre áreas de mejora y refinamiento. La fase de validación confirmó la funcionalidad y eficiencia del MEAP en contextos reales, facilitando la realización de ajustes y mejoras adicionales. Finalmente, en la fase de comunicación, se compartieron los conocimientos y resultados del MEAP con la

comunidad académica y profesional, fomentando el intercambio de ideas y colaboración en el campo de la arquitectura prefabricada.

Los próximos cinco capítulos se corresponden con cada de estas etapas del enfoque DSR: identificación del problema, creación de soluciones, evaluación y validación de soluciones, y comunicación de resultados. Cada una fue crucial, permitiendo que una idea conceptual evolucionara hacia un artefacto desarrollado y validado, capaz de abordar problemas reales en el campo de la arquitectura prefabricada.

Entre lo visible y lo invisible: la identificación del problema

En la constante búsqueda de eficiencia en el dominio de la industria de la construcción, la evaluación desempeña un papel central. Debe ser la brújula que guíe nuestros esfuerzos, el espejo en el que reflejemos nuestras acciones, el criterio que nos permita discernir entre el éxito y el fracaso. Pero, con tantas facetas y dimensiones, este acto de evaluar resuelta un desafío en sí mismo, que revisamos sucintamente a continuación.

Los sistemas y métodos de evaluación que prevalecen actualmente presentan una serie de limitaciones significativas. Tienden a concentrarse en aspectos aislados e individuales del proceso constructivo. Costo, tiempo de construcción y calidad del diseño son, sin duda, factores esenciales, pero una evaluación que se limite a estos componentes, por importante que sean, no hace justicia a la complejidad y la interrelación inherente a los proyectos de construcción modernos. Además, estos métodos suelen tener un carácter reactivo, en lugar de proactivo. Se enfocan en la identificación y resolución de problemas una vez que ya han surgido, en lugar de anticiparlos y prevenirlos.

Otro aspecto crítico es que los sistemas de evaluación actuales a menudo no reflejan adecuadamente la totalidad y la complejidad de los proyectos de construcción. Factores que adquieren cada vez más importancia en el marco de la *arquitectura civil 4.0*, como la sostenibilidad, la eficiencia energética, el impacto social y la resiliencia, se quedan sin representación en las evaluaciones convencionales. Ashouri et al. (2018)⁵⁰ explican que los métodos de evaluación disponibles en la actualidad no abordan generalmente los aspectos socioculturales y económicos de la sostenibilidad, ni la eficiencia energética y los impactos ambientales generados por los edificios (Tabla 1). En este contexto, relacionar las medidas de rendimiento de los edificios con indicadores más amplios presenta un desafío.

Estudios	Características del edificio	Eficiencia y operación del sistema	Comportamiento del ocupante	Condiciones climáticas
ZHANG ET AL., 2018 On the feature engineering of building energy data mining.	X	X		X
DING ET AL., 2018 Building energy savings: Analysis of research trends based on text mining.	X	X		
SATO ET AL., 2018 Data mining based on clustering and association rule analysis for knowledge discovery in multiobjective topology optimization.	X			
MAGALHÃES ET AL., 2017 Modeling the relationship between heating energy use and indoor temperatures in residential buildings through Artificial Neural Networks considering occupant behavior.		X	X	X
FAN ET AL., 2017 Unsupervised Data Analytics in Mining Big Building Operational Data for Energy Efficiency Enhancement	X	X		
MOLINA-SOLANA ET AL., 2017 Data science for building energy management	X	X		
ZHOU ET AL., 2016 Understanding household energy consumption behavior: The contribution of energy big data analytics.		X	X	
CAPOZZOLI ET AL., 2015 Fault detection analysis using data mining techniques for a cluster of smart office buildings.	X			

⁵⁰ (Ashouri, Haghighat, Fung, Lazrak, & Yoshino, 2018). A review of occupancy sensing and occupancy modeling methods for residential buildings. Building and Environment, 90-102.

FAN ET AL., 2015 A framework for knowledge discovery in massive building automation data and its application in building diagnostics.	X	X		
LEE ET AL., 2014 An agent-based approach to model active behaviors.		X		X
BONTE ET AL., 2014 Impact of occupant's actions on energy building performance and thermal sensation.		X		

Tabla 1 – Estudios sobre la utilización de la metodología BIM que analizan las características del edificio, la eficiencia y operación del sistema, el comportamiento del ocupante y las condiciones climáticas. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, la falta de estandarización en estos métodos dificulta la comparación y el intercambio de resultados entre diferentes proyectos, o incluso a lo largo del tiempo dentro de un mismo proyecto. Este déficit de coherencia puede entorpecer la comunicación y la colaboración entre los distintos actores involucrados.

Además, el ritmo de adopción de nuevas tecnologías en los procesos de evaluación ha sido tradicionalmente lento en la industria de la construcción. Esto ha dado lugar a una escasa integración de herramientas como el BIM, las ontologías y el modelado del conocimiento en los sistemas de evaluación actuales, a pesar del potencial que tienen para incrementar la eficiencia y la precisión de la evaluación.

Resultaba patente la necesidad de un nuevo enfoque que subsanara estas deficiencias en consonancia con los objetivos de la *arquitectura civil 4.0*. En este escenario, la ideación del MEAP se propone como una solución prometedora a este desafío. Ofrece un marco de evaluación multidisciplinario, estandarizado y basado en datos que tiene el potencial de transformar la forma en que realizamos la evaluación en la industria de la construcción, alineándose con la nueva era de la construcción digital.

Lo palpable: la creación de soluciones

El marco de evaluación propuesto por el MEAP está centrado en el reconocimiento y adaptación a la complejidad de los proyectos actuales, y se articula en torno a tres ejes principales: integración multidisciplinaria, estandarización y enfoque basado en datos. Estos tres ejes convergen para formar una metodología de evaluación que busca ser robusta y versátil para abordar una amplia gama de aspectos, desde lo económico hasta lo estético:

1. **Integración Multidisciplinaria:** El MEAP se basa en un enfoque integrado que recoge y sintetiza el conocimiento de diversas disciplinas – arquitectura, tecnologías de la información, gestión de la construcción e ingenierías civil, ambiental y de producción. Esta integración busca que todos los aspectos relevantes del proceso constructivo se consideren, desde cuestiones estructurales y mecánicas hasta aspectos relacionados con la sostenibilidad y eficiencia energética. Al incorporar activamente la perspectiva de arquitectos, ingenieros civiles y expertos en sostenibilidad, se garantiza una comprensión más profunda y precisa del proyecto en cuestión.
2. **Estandarización:** Una característica esencial del MEAP es su enfoque en la estandarización. En el contexto de una industria que puede enfrentar variaciones en procedimientos y criterios, el MEAP proporciona un conjunto uniforme de directrices y estándares. Esta uniformidad es fundamental para garantizar la replicabilidad y comparabilidad en las evaluaciones, independientemente de las especificidades de un proyecto determinado.

3. **Enfoque basado en datos:** En una era dominada por la digitalización, los proyectos de construcción son fuentes masivas de datos. El MEAP reconoce y aprovecha esto, utilizando datos extensivos para realizar evaluaciones objetivas y detalladas. Ya sea para medir la eficiencia energética, evaluar el uso de recursos o examinar cualquier otro criterio, el enfoque basado en datos permite una evaluación precisa y respaldada por datos concretos.

Al combinar estos elementos, el MEAP ofrece una respuesta para los desafíos actuales de la evaluación en la industria de la construcción, alineándose plenamente con los principios de la construcción digital y la *arquitectura civil 4.0*. La creación de esta metodología se justifica por la necesidad de contar con un marco de evaluación que permita abordar no solo aspectos económicos y de rendimiento, sino también cuestiones arquitectónicas, estéticas y de confort.

En este sentido, este método no solo se postula como un instrumento técnico, sino como un recurso para impulsar la evolución de la AIC en su intención de avanzar en la integración de nuevas tecnologías y enfoques en el campo de la construcción. Esto se alinea con las demandas de la industria y contribuye a la mejora de los sistemas prefabricados y su aplicación en la arquitectura contemporánea.

Lo medible en enfoque: la evaluación y validación de las soluciones

La evaluación y validación en el ámbito de la DSR, particularmente en el contexto de sistemas constructivos prefabricados, no es solo una etapa sino un pilar. Esta fase garantiza que las soluciones propuestas, en este caso el MEAP, cumplan con los requisitos y expectativas iniciales y respondan a los problemas identificados.

La relevancia de esta etapa radica en su capacidad para proporcionar feedback sobre el valor y la eficacia del artefacto o método propuesto. No se trata solo de comprobar si funciona, sino de asegurarse de que está generando un impacto en el campo de estudio. En el contexto del MEAP, evaluar y validar implica determinar si el método es capaz de abordar diversos aspectos de los sistemas prefabricados, desde factores económicos hasta criterios estéticos y de confort.

Fundamentos del MEAP

Concebido desde una visión integradora, el MEAP fue pensado como una respuesta a la creciente complejidad de la arquitectura prefabricada. Los sistemas constructivos tradicionales, aunque efectivos en muchos contextos, no siempre son adecuados para enfrentar los desafíos contemporáneos en términos de eficiencia, rapidez y adaptabilidad. En este escenario, la arquitectura prefabricada surgió como una opción prometedora, pero su implementación requiere una evaluación basada en criterios sólidos y técnicamente fundamentados.

Uno de los pilares fundamentales del MEAP es su interdisciplinariedad. Reconoce que la arquitectura prefabricada no es simplemente una cuestión de ingeniería o diseño, sino una conjunción de múltiples campos del saber. De esta forma, el modelo integra aportes de la ingeniería civil, diseño arquitectónico, economía de la construcción y, crucialmente, las tecnologías de la información.

La incorporación del BIM, del modelado de conocimiento y las ontologías refleja esta visión integradora. El BIM, por su capacidad para representar digitalmente las características físicas y funcionales de un edificio, ofrece una simulación detallada del comportamiento de los sistemas prefabricados en diferentes contextos. Permite anticipar,

por ejemplo, cómo responderá un material específico a ciertas condiciones climáticas o cómo una estructura se adaptará a las particularidades de un terreno.

El modelado de conocimiento se enfoca en la representación estructurada de la información, permitiendo descubrir y comprender patrones inherentes, y establecer relaciones causales entre diferentes variables que podrían pasar desapercibidas en un análisis superficial. Esta visión panorámica también facilita la predicción y simulación de comportamientos y resultados en diferentes escenarios.

Las ontologías, por su parte, se centran en la definición precisa y detallada de conceptos, proporcionando un marco semántico que evita ambigüedades y asegura la consistencia a lo largo del proceso investigativo. En el contexto del MEAP, las ontologías garantizan que los términos, definiciones y criterios adoptados sean aplicados de manera uniforme, sin lugar a interpretaciones erróneas o desviaciones conceptuales. Esta uniformidad y claridad conceptual es fundamental para que los resultados del modelo sean replicables, comparables y válidos en diferentes contextos y aplicaciones.

La adaptabilidad es otra característica intrínseca del MEAP. Al ser un modelo de evaluación, no es estático. Se espera que evolucione a medida que surjan nuevos desafíos y se desarrolle nuevo conocimiento en el campo de la arquitectura prefabricada.

Finalmente, cabe resaltar la centralidad del diálogo en la concepción del MEAP. Este modelo no solo fue creado con base en la teoría y la investigación académica, sino que se nutrió de la interacción directa con profesionales del sector. Las conversaciones con arquitectos, ingenieros y gestores de la empresa Astori proveyeron insights esenciales que dieron forma y profundidad al modelo.

Proceso de evaluación con el MEAP

La arquitectura prefabricada en hormigón abarca un espectro vasto y diverso de aplicaciones y consideraciones, englobando desde intrincados detalles técnicos y constructivos hasta exigentes criterios de sostenibilidad y estética. En este contexto, el MEAP se presenta como una herramienta diseñada para abordar eficientemente estas multifacéticas escalas.

El proceso de evaluación del MEAP se desarrolla en un marco estructurado. Comienza con la recopilación de datos del modelo BIM. En esta fase, se crea un modelo digital que refleja fielmente cada aspecto, detalle y componente de la construcción en cuestión. No se trata simplemente de una imitación del diseño, sino de una fuente de información que se puede analizar y manipular. A continuación, se introduce la aplicación de las ontologías, que actúan como una especie de “filtro de calidad”⁵¹, garantizando que todos los términos, conceptos y parámetros abordados en el modelo sean coherentes, precisos y estén alineados con los estándares y convenciones aceptadas en el campo de la arquitectura prefabricada.

De manera simultánea, se emplea el modelado de conocimiento, que tiene como objetivo principal profundizar en la comprensión de los sistemas, desentrañar sus complejidades y descubrir patrones subyacentes. Al identificar estas relaciones y patrones entre diferentes variables, se obtiene una visión más clara de cómo los componentes individuales interactúan y contribuyen al sistema en su conjunto.

⁵¹ Al igual que un filtro real que separa las impurezas o elementos no deseados de una sustancia, en este caso, las ontologías actúan asegurando que la información, términos y conceptos presentes en el modelo sean coherentes, precisos y estén alineados con los estándares del dominio. Esta función es crucial para mantener la integridad y exactitud de la información a lo largo del proceso de análisis, garantizando que los resultados sean confiables y representativos del sistema o fenómeno estudiado.

Finalmente, para consolidar la fiabilidad y validez del análisis, se realizan una serie de simulaciones y pruebas basadas en escenarios reales y teóricos. Estas simulaciones proporcionan información valiosa, resaltando áreas que pueden beneficiarse de mejoras, identificando potenciales optimizaciones y, crucialmente, anticipando fallos o incongruencias que podrían surgir en situaciones prácticas. Este enfoque integral asegura que las soluciones derivadas del MEAP sean no sólo teóricamente sólidas, sino también prácticamente aplicables.

Para tanto, se estableció un conjunto claro de criterios y subcriterios, centrados en las características intrínsecas de la arquitectura prefabricada en hormigón de la empresa Astori. Son el resultado de un estudio amplio y consultas con expertos en el campo. Cada criterio fue seleccionado basándose en su relevancia para el sector, y abarca tanto aspectos técnicos y funcionales como aquellos relacionados con la sostenibilidad, economía, y adaptabilidad.

La siguiente tabla presenta de manera esquemática estos criterios, proporcionando una descripción de cada uno, así como los componentes o subcriterios asociados que deberían considerarse en una evaluación. Sirve como guía para los profesionales involucrados en el proceso constructivo, desde ingenieros y arquitectos hasta gestores de proyectos y responsables de la toma de decisiones. Presentan los indicadores utilizados para el análisis de cada uno de estos subcriterios o componentes. A continuación, se presenta la Tabla 2 con los criterios de evaluación:

Criterio ⁵²	Subcriterios o Componentes ⁵³	Descripción ⁵⁴	Indicadores ⁵⁵
Calidad del hormigón	Resistencia a compresión	Capacidad del hormigón de soportar cargas sin sufrir deformaciones o fracturas.	Valor en MegaPascales (MPa)
	Durabilidad	Resistencia del hormigón a factores ambientales, químicos y físicos.	Años antes del primer mantenimiento significativo.
	Homogeneidad	Uniformidad en la mezcla del hormigón, evitando segregaciones o zonas con diferentes características.	Variabilidad en las pruebas de muestreo.
Eficiencia de producción	Rapidez en la fabricación	Velocidad con la que se pueden producir las piezas prefabricadas.	Unidades producidas por hora.
	Adaptabilidad a cambios en diseño	Facilidad con la que el proceso de producción puede adaptarse a cambios en el diseño de los componentes prefabricados.	Horas necesarias para adaptarse a un nuevo diseño.
Sostenibilidad ambiental	Reducción de residuos	Medidas tomadas para minimizar el desperdicio durante el proceso de producción.	Porcentaje de materiales reciclados o reutilizados.
	Uso de materiales sostenibles	Extensión en la que se utilizan materiales ecológicos o reciclados en la producción.	Porcentaje de materiales sostenibles en el producto final.
Economía y costos	Costo comparativo	Evaluación del costo de los componentes prefabricados en relación con otras opciones de construcción.	Costo por unidad en comparación con alternativas.
	Valor a largo plazo	Evaluación de los costos de mantenimiento, durabilidad y otros factores que afectan el costo total de propiedad durante la vida útil de la estructura.	Costo total durante un período de 10 años, incluyendo mantenimiento.
Aspectos logísticos	Facilidad de transporte	Consideraciones sobre el tamaño, peso y forma de los componentes para su transporte.	Número de unidades transportables por carga.
	Tiempo de instalación	Duración requerida para instalar las piezas prefabricadas en el sitio de construcción.	Horas necesarias para instalar una unidad.
Flexibilidad del diseño	Variedad de acabados	Diversidad de texturas, colores y formas que pueden lograrse con el hormigón prefabricado.	Número de acabados disponibles.
	Adaptabilidad arquitectónica	Habilidad del hormigón prefabricado para adaptarse a diferentes estilos y requerimientos arquitectónicos.	Número de diseños diferentes producidos en el último año.
Seguridad	Comportamiento ante sismos	Rendimiento del hormigón prefabricado en áreas propensas a terremotos.	Grado de resistencia sísmica, basado en normativas internacionales.
	Resistencia al fuego	Capacidad del hormigón prefabricado para resistir altas temperaturas sin perder su integridad estructural.	Tiempo (en minutos) de resistencia al fuego.
Mantenimiento	Frecuencia de mantenimiento	Periodicidad con la que las estructuras de hormigón prefabricado requieren intervenciones de mantenimiento.	Años antes del primer mantenimiento significativo.
	Costo de mantenimiento	Gastos asociados con el cuidado y reparación de las estructuras de hormigón prefabricado a lo largo de su vida útil.	Costo promedio de mantenimiento por año.
Integración con otros materiales	Compatibilidad con aceros	Cómo se integra el hormigón prefabricado con refuerzos o estructuras de acero.	Porcentaje de proyectos que

⁵² Se refiere a la categoría general o el área principal de enfoque para la evaluación del sistema constructivo prefabricado en hormigón.

⁵³ Este corresponde a los elementos o factores específicos que componen cada criterio general y que permiten un análisis más detallado.

⁵⁴ Un breve resumen que explica la relevancia y el propósito de cada criterio y subcriterio, proporcionando una comprensión más profunda de su importancia en el contexto de la evaluación del sistema constructivo prefabricado en hormigón.

⁵⁵ Estos son las métricas o las medidas específicas que se utilizarán para evaluar el desempeño o la calidad en relación con el criterio y subcriterio correspondiente.

			incorporan acero sin inconvenientes.
	Integración con vidrios y otros acabados	Facilidad con la que otros materiales de construcción, como vidrios o revestimientos, pueden incorporarse o adjuntarse a las estructuras de hormigón prefabricado.	Número de opciones de integración disponibles.
Innovación y tecnología	Uso de tecnologías avanzadas en la producción	Incorporación de técnicas o maquinarias de vanguardia en el proceso de fabricación.	Número de tecnologías modernas implementadas en el proceso de producción.
	Posibilidades de digitalización y automatización	Grado en el que se pueden integrar tecnologías digitales o automatizadas en la producción y colocación del hormigón prefabricado.	Porcentaje de procesos que son digitalizados o automatizados en la producción.

Tabla 2 – Evaluación de criterios y subcriterios esenciales para el análisis y mejora del sistema constructivo prefabricado en hormigón de la empresa Astori. Esta tabla presenta un desglose detallado de los componentes específicos que caen bajo cada criterio general, proporcionando una descripción precisa de su relevancia y función en el contexto de la producción prefabricada en hormigón. Fuente: Elaboración propia.

La elección de estos criterios se derivó de una combinación de los imperativos técnicos, económicos, ambientales y sociales que actualmente dominan el paisaje de la construcción civil y arquitectónica. Cada criterio refleja una respuesta a un problema contemporáneo o a una demanda emergente.

Validación de soluciones

La validación del MEAP fue una tarea que requirió una combinación de herramientas avanzadas y una metodología robusta para garantizar que el modelo se ajustara fielmente a la realidad constructiva y a las demandas del sector.

Dentro de esta validación, el modelado BIM ocupó un papel central. Al utilizar programas como el Revit o el ArchiCAD, se logró representar con precisión estructuras prefabricadas en un entorno digital. Estos softwares facilitaron la creación de estructuras digitales y permitieron simular, modificar y probar diferentes escenarios constructivos. La capacidad

de estos programas de generar visualizaciones tridimensionales y de incorporar múltiples capas de información resultó esencial para entender a fondo las estructuras prefabricadas y sus componentes. En el proceso de validación, estos programas demostraron ser una herramienta para el desarrollo detallado y preciso del modelado BIM centrado en sistemas prefabricados. Permitieron representar con fidelidad las estructuras, considerando todas las características intrínsecas de los sistemas prefabricados. Logró la representación geométrica de los elementos y la incorporación de datos para cada componente, como materiales, propiedades térmicas, acústicas y estructurales.

La interacción en tiempo real que ofrecen Revit y ArchiCAD con su entorno tridimensional facilitó la detección y corrección de posibles incongruencias o conflictos en el diseño (Ilustración 30), aspecto de suma importancia en sistemas prefabricados, donde la precisión es vital. El software permitió, además, la simulación de diferentes etapas constructivas para una visión integral del proceso de montaje y ensamblaje de los componentes prefabricados.

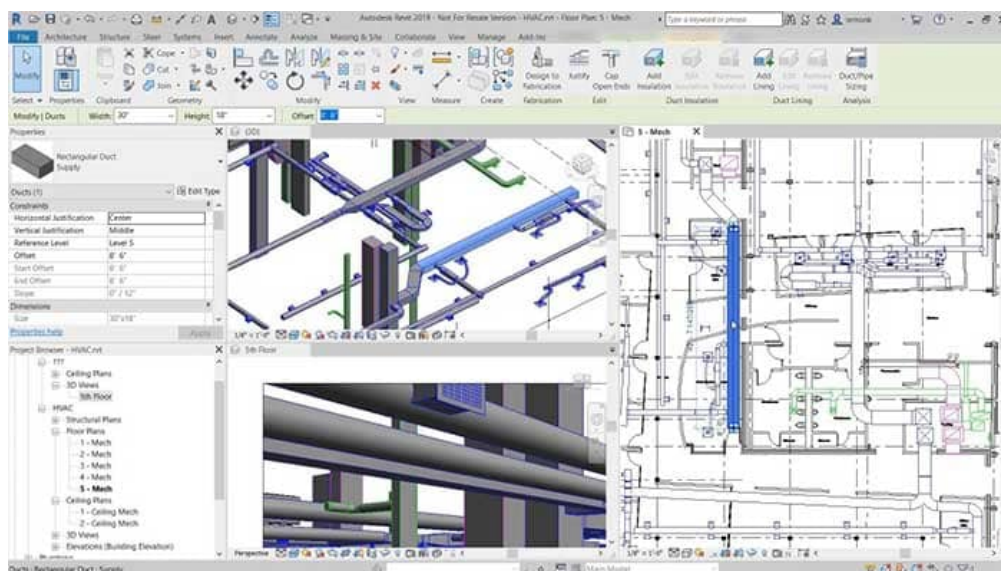


Ilustración 30 – Análisis de conflicto entre la estructura y los demás sistemas del proyecto. [Entorno de trabajo del software Revit]. Fuente: Revit.

El aporte del modelo BIM al MEAP también permitió una comprensión más profunda de sus interrelaciones y comportamientos, y se identificó la necesidad de una evaluación más específica sobre la sostenibilidad y el comportamiento medioambiental de estas estructuras.

Ecotect⁵⁶ surgió como el complemento para este propósito, ya que permite realizar diversas simulaciones relacionadas con la construcción. Siendo una herramienta que ofrece una amplia gama de simulaciones relacionadas con la construcción, añadió una dimensión crítica centrada en la sostenibilidad, desde análisis de iluminación hasta el termal y acústico (Ilustración 31). No se trataba solo de cómo se ve o cómo se construye una estructura, sino de cómo se comporta en términos energéticos y medioambientales a lo largo de su vida útil.

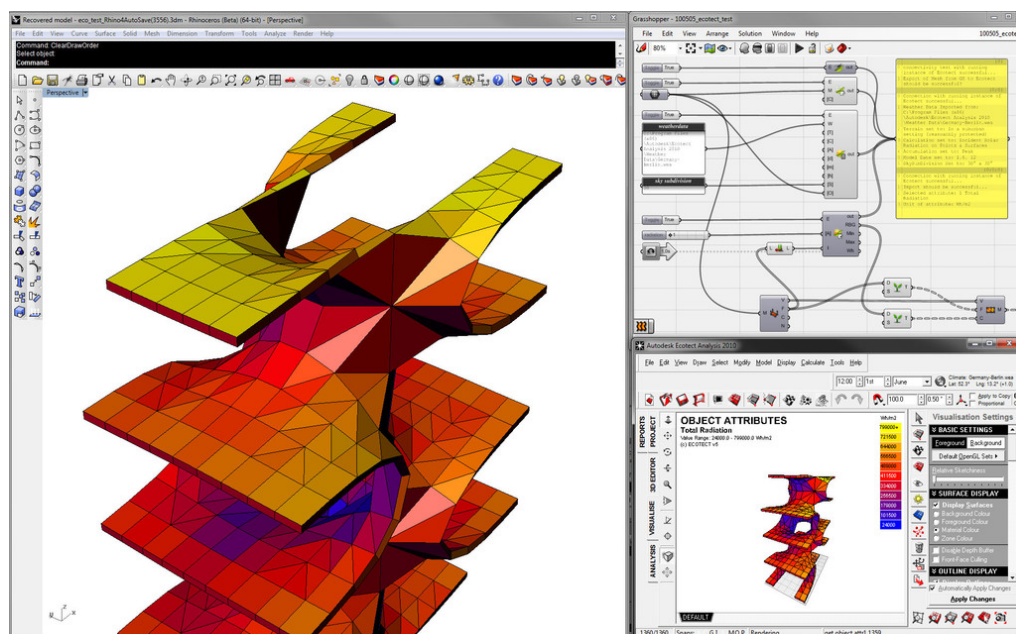


Ilustración 31 – Análisis de la incidencia solar en los elementos del proyecto, con su respectiva correlación con los datos del modelo BIM. [Entorno de trabajo del software Ecotect]. Fuente: Ecotect.

⁵⁶ Fue adquirida por Autodesk y se integró en su conjunto de herramientas para proporcionar análisis detallados y evaluaciones de rendimiento energético.

Para realizar este análisis, se introdujeron en Ecotect los datos detallados del modelo BIM, incluyendo materiales, orientación, ubicación geográfica y especificaciones técnicas. Se realizaron simulaciones que abarcaban desde la iluminación natural, pasando por la dinámica térmica hasta la acústica del edificio. Estas simulaciones ofrecieron una representación cuantitativa del desempeño de la estructura en diferentes escenarios y permitieron identificar áreas de mejora y optimización.

La incorporación de datos y análisis de Ecotect aseguró que el MEAP no solo se basara en aspectos estéticos o constructivos tradicionales, sino que también incorporara criterios de sostenibilidad y eficiencia energética. Esto amplió el alcance del MEAP, permitiéndole abordar preocupaciones medioambientales crecientes en un panorama de construcción orientado hacia prácticas más sostenibles.

Tras este enfoque, la investigación del MEAP se orientó hacia el análisis contextual de los estudios de caso en su entorno geográfico. El Sistema de Información Geográfica (GIS)⁵⁷ fue importante en este proceso. Permitió visualizar las edificaciones en un entorno geográfico determinado y simular su comportamiento. Esto proporcionó una comprensión más detallada de cómo las condiciones externas, la orientación solar y el clima pueden influir en la eficacia de las estructuras prefabricadas y, por lo tanto, cómo estas pueden ser optimizadas en función de esos factores.

Para la integración de datos geográficos, resultó fundamental la consulta y utilización de bases de datos oficiales y confiables. En Argentina, se recurrió al portal del Instituto Geográfico Nacional⁵⁸, que provee una variedad de informaciones cartográficas y geoespaciales para obtener una visión de las condiciones geográficas. En el contexto

⁵⁷ Tecnología que se utiliza para capturar, almacenar, manipular, analizar y presentar datos espaciales o geográficos. Estos sistemas permiten a los usuarios entender patrones y relaciones geográficas, proporcionando una capa adicional de análisis en proyectos que requieren una perspectiva geoespacial.

⁵⁸ Accesible en <https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/SIG>.

uruguayo, se utilizó el portal de la Infraestructura de Datos Espaciales de Uruguay⁵⁹, una plataforma que ofrece detalles y capas de información para comprender en detalle el entorno geográfico. Ambos casos aseguraron la precisión y actualidad de la información.

Por otro lado, el análisis de datos se vio potenciado por la utilización de Power BI⁶⁰. Más allá de convertir datos en gráficos, esta herramienta ayudó a interpretar grandes volúmenes de información, identificar tendencias y, lo más importante, tomar decisiones informadas basadas en evidencias. A través de Power BI, se consolidó la información de múltiples fuentes, facilitando la toma de decisiones y la identificación de áreas de mejora.

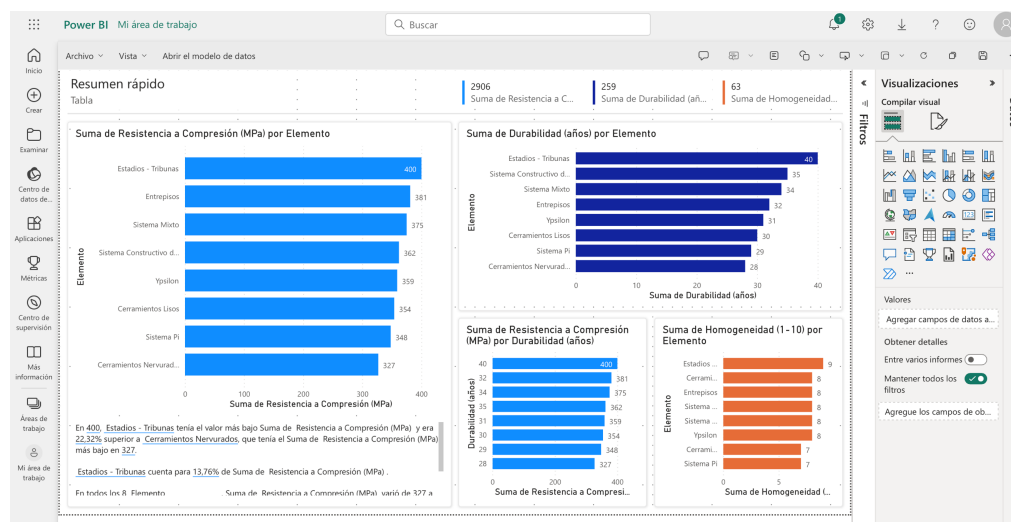


Ilustración 32 – Consolidación de los datos de los elementos del sistema Astori analizados según resistencia a compresión, durabilidad y homogeneidad. [Entorno de trabajo del software Power BI]. Fuente: Power BI.

En síntesis, entre las múltiples herramientas empleadas en este proceso, se observa una transición lógica desde la representación visual de datos hasta su análisis. Aunque Power

⁵⁹ Accesible en <https://www.gub.uy/infraestructura-datos-espaciales>.

⁶⁰ Es una herramienta de análisis de negocios desarrollada por Microsoft, que ofrece visualizaciones interactivas y capacidades de inteligencia empresarial con una interfaz intuitiva. Se utiliza para analizar datos y compartir insights a través de paneles y gráficos interactivos, permitiendo la toma de decisiones basada en datos.

BI proporciona una visión estructurada y elucidativa de los datos, y hace más accesible su interpretación y la consecuente toma de decisiones, fue el Sequential Pattern Mining Framework (SPMF)⁶¹ el que adentró la investigación en un análisis más riguroso y meticuloso de dicha información. Con su metodología enfocada en la minería de datos, aportó una profundidad técnica crucial al análisis.

La minería de datos introdujo una nueva dimensión al proceso. Al bucear en grandes conjuntos de datos, se identificaron patrones, correlaciones y conexiones que no eran evidentes a primera vista. A lo largo del análisis realizado mediante el SPMF, se identificaron diversos hallazgos, tanto en la eficiencia constructiva como en la interacción con el entorno. A continuación, se presenta la Tabla 3 que resume de manera detallada algunos de estos hallazgos que surgieron de la minería de datos y su relación con sistemas constructivos prefabricados.

Aspecto Analizado	Descubrimiento concreto
Eficiencia constructiva	1. Combinación de paneles de hormigón prefabricados con técnicas de ensamblaje modular resultó en una reducción aproximada del 25% en tiempos de construcción.
	2. La prefabricación en entornos controlados redujo errores de construcción en un 20% aproximadamente.
	3. El uso de conexiones mecánicas estandarizadas agilizó el montaje en sitio.
	4. La automatización en la producción de componentes redujo el desperdicio de materiales.
	5. La estandarización de dimensiones facilitó el transporte y logística de los componentes prefabricados.
Desempeño térmico	1. Uso de hormigón con agregados mejoró la resistencia térmica en zonas con altas temperaturas.
	2. Incorporación de aislamiento térmico integrado en los paneles redujo, en algunos casos, la necesidad de sistemas de climatización.
	3. Paneles de doble capa con espacio de aire en medio ofrecieron mejor aislamiento térmico.
	4. Superficies con acabados reflectantes disminuyeron la absorción de calor.
	5. Integración de sistemas de sombreado prefabricados mejoró la eficiencia térmica en fachadas expuestas al sol.

⁶¹ SPMF (Sequential Pattern Mining Framework) es un software de código abierto iniciado en la Universidad de Montpellier, en Francia. Originalmente desarrollado para propósitos de minería de datos y aprendizaje automático, SPMF se ha adaptado para su aplicación en una variedad de campos, incluyendo la construcción civil, como se ilustra en este estudio. El software se ha ganado una reputación por su eficacia en el análisis de patrones secuenciales, lo que ha sido de gran utilidad para identificar y optimizar flujos de trabajo en el sector de la construcción.

Durabilidad y mantenimiento	1. El uso de tratamientos superficiales antifúngicos y anti-moho en paneles mejoró la durabilidad en entornos húmedos.
	2. Técnicas de prefabricación mejoradas redujeron las imperfecciones en la superficie, reduciendo la necesidad de reparaciones.
	3. Materiales auto limpiantes minimizaron el mantenimiento requerido.
	4. Diseño modular facilitó la sustitución de piezas dañadas sin afectar a estructuras adyacentes.
Interacción con el entorno	1. Paneles con acabados reflectantes integraron mejor con entornos urbanos, minimizando el efecto isla de calor.
	2. La prefabricación permitió una integración más armoniosa con el paisaje circundante al minimizar la excavación y alteración del sitio.
	3. Componentes diseñados para maximizar el uso de la luz natural redujeron la necesidad de iluminación artificial.
	4. La utilización de materiales locales en la fabricación redujo la huella de carbono relacionada con el transporte.
Configuraciones espaciales óptimas	1. Espacios abiertos favorecieron una mejor ventilación.
	2. Las configuraciones de planta abierta optimizan la iluminación natural.
Efectividad de sistemas de aislamiento	1. El aislamiento basado en poliuretano presentó el mejor rendimiento en condiciones extremas.
	2. Los sistemas de doble muro optimizan la inercia térmica.
	3. Las soluciones de aislamiento basadas en materiales reciclados mostraron un rendimiento comparable al de los materiales tradicionales.
	4. El aislamiento superior en techos es crucial para la eficiencia energética en climas cálidos.
Tipos de acabados superficiales	1. Los acabados reflectantes en techos reducen la ganancia de calor.
	2. Los acabados oscuros en interiores mejoran la absorción térmica en climas fríos.
	3. Las superficies rugosas demostraron tener ventajas en la acústica interior.
Técnicas de ensamblaje y conexión	1. Las conexiones atornilladas ofrecieron un ensamblaje más rápido y seguro.
	2. Las técnicas de ensamblaje por encaje redujeron la necesidad de hardware adicional.
	3. Las conexiones modulares presentaron menos errores en el sitio de construcción.
	4. Las técnicas de soldadura en el lugar mostraron alta resistencia y durabilidad.

Tabla 3 – Hallazgos más relevantes obtenidos del análisis detallado realizado con la herramienta SPMF. Se categorizan los resultados en aspectos específicos que influyen en la eficacia de los sistemas prefabricados, tales como combinaciones de componentes, materiales utilizados, técnicas implementadas, tendencias identificadas y otros datos valiosos que surgieron del estudio. Fuente: Elaboración propia.

Estos descubrimientos presentados en la tabla ponen en claro el detalle con el que se pueden analizar los sistemas prefabricados mediante herramientas avanzadas, y subrayan la relevancia de considerar múltiples aspectos para obtener soluciones más integrales.

Sirvieron como una guía para refinar y mejorar futuras implementaciones de estos sistemas, en correspondencia con los desafíos contemporáneos y sus respectivos beneficios.

Estas herramientas, combinado con la colaboración de expertos en arquitectura prefabricada, permitieron configurar un proceso de validación detallado para el MEAP, garantizando que el modelo se ajustara a la teoría y reflejara la práctica y las demandas reales del sector constructivo prefabricado.

Lo transmisible: la comunicación de los resultados

La implementación y la validación del MEAP desencadenaron un desafío crucial: ¿cómo comunicar sus resultados de manera efectiva a los profesionales de la construcción? La respuesta se materializó en la forma del plugin PREAPP, una solución pragmática diseñada para facilitar la adopción y comprensión de los hallazgos del MEAP.

El MEAP constituye un compendio riguroso de datos, análisis y directrices. A pesar de que su detalle y exhaustividad representan sus principales activos, la transmisión efectiva de esta vasta cantidad de información puede resultar difícil. Es en este contexto que el plugin PREAPP adquiere relevancia. Esta herramienta no se limita a ser un medio de exposición para los resultados del MEAP, sino que actúa como una extensión integrada del mismo. Centraliza y estructura los descubrimientos, análisis y recomendaciones del MEAP, ofreciéndolos en un formato claro y funcional.

El PREAPP no se limita a ser un simple visualizador de datos: va más allá. Basándose en los resultados del MEAP, ofrece recomendaciones concretas a los profesionales de la construcción y los ayuda a tomar decisiones informadas en relación con la implementación del sistema Astori y otros sistemas prefabricados en hormigón. La herramienta se

construyó con el objetivo de ser intuitiva para facilitar su adopción, incluso entre aquellos que podrían no estar familiarizados con el intrincado mundo de la arquitectura prefabricada. Mientras que el MEAP proporciona un enfoque teórico y metodológico, el PREAPP es su contraparte aplicada. Su enfoque es práctico y se centra en ofrecer soluciones tangibles a problemas reales.

Explorado el proceso de desarrollo del MEAP, según el enfoque de la DSR, a continuación nos adentramos en la creación del modelo.

Hacia un modelo de evaluación

La configuración del MEAP

Ya se dejó que el MEAP surgió como respuesta a desafíos contemporáneos en la evaluación de proyectos de construcción y se presenta como un entrenamiento previo a la expedición hacia la *arquitectura civil 4.0*. El MEAP se basa en principios de evaluación proactiva y prioriza la identificación y gestión de los riesgos y problemas desde el inicio del proyecto. Procura colaborar en la toma de decisiones, minimizando errores y retrasos, y maximizando la calidad y el valor del proyecto. En su estructura, se integra a la utilización de tecnologías de vanguardia, como el BIM, las ontologías y el modelado de conocimiento, y permite así una evaluación precisa, eficiente y colaborativa. Estas tecnologías también facilitan la comunicación y la colaboración entre los actores involucrados en un proyecto, fomentando un ambiente de trabajo cohesivo y productivo.

Presentamos el MEAP como una herramienta diseñada para cuantificar y calificar diferentes aspectos de la implementación de la *arquitectura civil 4.0*. Expresa su demanda de innovación y mejora, se fundamenta en los principios y técnicas explorados en capítulos anteriores; incorpora las ideas de colaboración y eficiencia promovidas por la metodología BIM; utiliza las ontologías para proporcionar un lenguaje claro y consistente; y aplica el modelado del conocimiento para hacer conexiones significativas y útiles.

El MEAP busca ayudar a tomar decisiones informadas y reflexivas. No se trata simplemente de medir, sino de entender. Cada aspecto está diseñado para ofrecer una perspectiva completa y útil sobre los proyectos, de manera que puedan utilizarse para mejorar las prácticas y lograr mejores resultados.

La estructura del MEAP es flexible y modular. Esto significa que se puede adaptar para satisfacer necesidades específicas a diferentes proyectos y contextos. Aunque proporciona

un marco general de evaluación, no es rígido. Reconoce la complejidad y la diversidad de la industria de la construcción y busca proporcionar una herramienta que pueda ser útil en una variedad de situaciones. El MEAP no es solo un instrumento para evaluar resultados, también es un medio para impulsar la mejora. Al proporcionar una retroalimentación clara y basada en datos sobre el rendimiento de un proyecto, puede ayudar a identificar áreas de debilidad y oportunidades para la mejora. Es una herramienta para el aprendizaje y la innovación constante.

Los componentes esenciales del modelo MEAP fueron diseñados para capturar la complejidad y la naturaleza interconectada de los proyectos de construcción. La síntesis de su estructura se puede observar en la Ilustración 33.

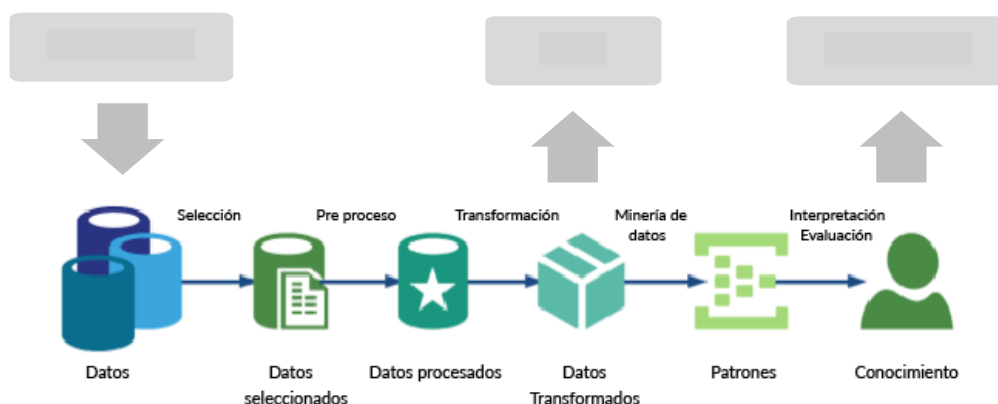


Ilustración 33 – Proceso de estructuración del MEAP – Selección, Preproceso, Transformación, Minería de datos, Interpretación y evaluación. Fuente: Elaboración propia.

Se inicia con el modelo BIM que suministra los datos primordiales. De este, se extraen datos pertinentes que, posteriormente, son filtrados según relevancia, estableciendo métricas de evaluación y métricas paramétricas. Estos datos se procesan, limpiándolos y adaptándolos según normativas. Luego, se codifican para su transformación y adecuación a la minería de datos. Con la ayuda del software SPMF, adaptado al ámbito de la

arquitectura civil, se descubren patrones y relaciones en los datos. Estos patrones se interpretan y evalúan para comprender su significado y aplicación en decisiones o mejoras. Finalmente, el conocimiento adquirido se aplica de nuevo en el modelo BIM para su revisión y mejora, culminando así el ciclo del MEAP. A continuación, se presenta una descripción detallada de cada una de estas etapas.

Herramientas de modelado y visualización

Las herramientas de modelado y visualización, esenciales en cualquier proyecto de construcción moderno, los son aún más en el contexto de los sistemas constructivos prefabricados en hormigón. Son efectivos como medio para conceptualizar, analizar, optimizar y comunicar las características y el rendimiento de un diseño propuesto.

Modelar de manera precisa los elementos constructivos garantiza que se tomen en cuenta todas las variables pertinentes y que estas se reflejen en los diseños. Su modelado en un entorno digital ofrece ventajas. Permite simular y prever cómo reaccionará el sistema a diferentes condiciones y escenarios, ayudando a evitar problemas costosos y retrasos en el proceso de construcción. Proporciona una herramienta para experimentar y probar diferentes alternativas de diseño de una manera rápida, lo que es especialmente valioso en el desarrollo de sistemas prefabricados, donde los cambios de diseño pueden tener un impacto significativo en la eficiencia y la economía del sistema.

La visualización es otro componente importante para comunicar las ideas de diseño. Permite que proyectistas, clientes, constructores y otros actores comprendan claramente los conceptos de diseño y cómo se implementarán. Las herramientas de visualización pueden crear representaciones precisas y ayudar a identificar problemas potenciales, facilitar la toma de decisiones y garantizar que todos los actores estén en la misma página.

También pueden ser útiles para obtener retroalimentación y aprobación de las partes interesadas, un paso crítico en el proceso de diseño y construcción.

En el marco de esta tesis, se empleó BIM como herramienta de modelado y visualización. No solo proporcionó una representación gráfica del sistema constructivo, sino que también permitió su análisis en un entorno tridimensional virtual detallado, facilitando una visualización inmersiva y una comprensión más profunda del diseño.

BIM permite representar los elementos del sistema de manera precisa, y facilita una visualización comprensible y manipulable del proyecto. Fue posible experimentar con distintos diseños, materiales y sistemas constructivos, y examinar sus efectos en el rendimiento, costos y sostenibilidad de la construcción. Además, su enfoque centrado en los datos ha sido importante para el MEAP, que se basa en un análisis detallado de la información para generar recomendaciones y directrices para la mejora de los sistemas prefabricados.

Métricas de evaluación

Optimizar los sistemas constructivos no es una tarea simple: requiere de un enfoque integral que, a su vez, considere una amplia gama de factores. El MEAP se diseñó para abordar este desafío. Se seleccionó un conjunto de criterios y subcriterios que reflejaron los aspectos críticos para la optimización de estos sistemas. Estas métricas se seleccionaron a partir de los datos del modelo BIM y teniendo en cuenta factores técnicos, económicos, sociales y ambientales.

Calidad del hormigón

La calidad del hormigón se convirtió en un criterio principal debido a su papel fundamental en cualquier construcción. El MEAP considera los estándares técnicos convencionales del hormigón y también cómo interactúan con una gama compleja de variables, incluido el medio ambiente, el tipo de suelo y las tensiones estructurales esperadas en el proyecto.

La calidad del hormigón no es un parámetro aislado, sino que está ligada a diversos factores que podrían afectar la integridad de una estructura a lo largo de su vida útil: la humedad y la temperatura pueden afectar la resistencia del hormigón al fraguado; el tipo de suelo puede influir en cómo se distribuyen las cargas; el nivel de tensión estructural influye en la elección de distintos niveles de resistencia y flexibilidad del hormigón.

El MEAP utiliza las normas IRAM⁶² como punto de referencia para establecer este criterio. La norma IRAM 50000 establece que los requisitos físicos y mecánicos del cemento actúan como pilar en la evaluación de la calidad del material. Estos requisitos, detallados en las tablas 4 y 5, no son simples listas; son representativos de un conjunto de parámetros que han sido investigados y calibrados. Aseguran que el cemento, y por ende el hormigón, cumplirá con las expectativas en términos de resistencia y durabilidad, fundamental para cualquier sistema constructivo prefabricado.

⁶² Las normas IRAM (Instituto Argentino de Normalización y Certificación) representan un conjunto de estándares técnicos que son ampliamente reconocidos y utilizados en Argentina para diversas industrias, incluida la de la construcción. En el caso del cemento, que es un componente crucial del hormigón, las normas IRAM como la 50000 establecen criterios específicos relacionados con su calidad, incluidos requisitos físicos y mecánicos.

Requisito		Unidad	Mínimo	Máximo	Método de ensayo
Finura	Material retenido sobre el tamiz IRAM 75 μm	g/100 g	–	15,00	IRAM 1621
	Superficie específica	m ² /kg	250	–	IRAM 1623
Constancia de volumen	Expansión en autoclave	%	–	0,80	IRAM 1620
Tiempo de fraguado inicial	Categoría 30	min	75	–	IRAM 1619
	Categoría 40	min	60	–	
	Categoría 50	min	45	–	
Contracción por secado ¹⁾		%	–	0,15	IRAM 1761
Requerimiento de agua ¹⁾		g/100 g	–	64,00	IRAM 1761
¹⁾ Sólo se aplica para los cementos tipo CPP y CPC, que contengan puzolana y/o ceniza volante.					

Tabla 4 - Requisitos físicos del cemento [Requisitos, unidad, mínimo, máximo y método de ensayo]. Fuente: Norma IRAM 50000.

Categoría	Resistencia a la compresión (MPa) ¹⁾				Método de ensayo
	2 d	7 d	28 d		
30	–	mín. 16	mín. 30	máx. 50	IRAM 1622
40	mín. 10	–	mín. 40	máx. 60	
50	mín. 20	–	mín. 50	–	

¹⁾ En todos los casos, los valores de resistencia obtenidos a los 28 d deben ser mayores que los obtenidos a los 2 d y a los 7 d.

Tabla 5 - Requisitos mecánicos del cemento [Categorías, Resistencia a la compresión (MPa) y método de ensayo]. Fuente: Norma IRAM 50000.

En el marco del MEAP, la calidad del hormigón es más que un simple indicador de robustez; es una métrica que refleja cómo se espera que una estructura interactúe con su entorno y resista las fuerzas que se le aplicarán.

Eficiencia de producción

La eficiencia de producción se seleccionó como otro criterio clave en el modelo MEAP debido al imperativo de entregar alta calidad en plazos más cortos. Sin embargo, la eficiencia en este contexto es multidimensional. No se trata simplemente de acelerar la

producción, sino de cómo se puede acelerar mientras se mantiene o incluso mejora la calidad y se gestionan los costos de manera efectiva.

Para realizar un análisis de la eficiencia de producción en proyectos ya construidos, el MEAP vale de técnicas avanzadas de aprendizaje automático⁶³, específicamente, reglas de asociación⁶⁴ y algoritmos de clustering⁶⁵. Las reglas de asociación nos permiten descubrir relaciones interesantes entre diferentes variables en los datos del proyecto. Por ejemplo, podríamos encontrar que cierto tipo de hormigón es especialmente eficaz en términos de tiempo cuando se utiliza con un método de construcción particular, lo que podría ser una práctica recomendada para proyectos futuros.

Los algoritmos de clustering, por otro lado, nos permiten agrupar proyectos similares y analizar las características comunes que contribuyen a la eficiencia de producción. Resulta útil para identificar patrones y tendencias quizás no tan evidentes en una revisión superficial de los datos. Por ejemplo, podríamos descubrir que los proyectos que utilizan una combinación específica de materiales y técnicas tienden a ser entregados más rápidamente sin comprometer la calidad, proporcionando una valiosa información para futuras decisiones de construcción.

Estas técnicas de aprendizaje automático son efectivas cuando se manejan grandes conjuntos de datos, permitiendo hacer evaluaciones más detalladas y precisas. Por eso el MEAP no solo toma en cuenta las métricas estándar de tiempo, costo y calidad, sino que integra análisis más sofisticados para ofrecer un panorama más completo de la eficiencia de producción.

⁶³ Se refiere a métodos computacionales que permiten a los sistemas aprender de grandes cantidades de datos para realizar tareas específicas, como clasificación, detección de patrones y recomendaciones. Estas técnicas son especialmente útiles en campos donde las decisiones deben tomarse rápidamente y se necesita procesar grandes volúmenes de datos.

⁶⁴ Son una técnica de aprendizaje automático que tiene como objetivo descubrir relaciones interesantes o patrones ocultos entre variables en grandes bases de datos.

⁶⁵ Es una técnica que se emplea para agrupar un conjunto de objetos de tal manera que los objetos en el mismo grupo son más similares entre sí que con los que están en otros grupos.

Sostenibilidad ambiental

La sostenibilidad ambiental se posiciona como un criterio esencial dentro del modelo MEAP debido a la creciente consciencia global sobre los efectos del cambio climático y la necesidad de adoptar prácticas de construcción más responsables con el entorno. El hormigón, como uno de los materiales de construcción más utilizados en el mundo, tiene un papel destacado en la huella ambiental de cualquier proyecto. Por esta razón, se realiza un análisis pormenorizado de las diferentes composiciones del hormigón, evaluando cada una no sólo en términos de su resistencia y durabilidad, sino también en función de su huella de carbono.

Para esta evaluación, se utilizan herramientas de análisis de ciclo de vida que consideran desde la extracción de materias primas hasta la producción del cemento y su transporte. También se examinan las emisiones que se generan durante el proceso de mezcla y curado del hormigón, así como las relacionadas con su mantenimiento y eventual desmantelamiento.

La tabla 6 detalla cómo SimaPro evaluó el impacto ambiental del hormigón a lo largo de su ciclo de vida. Se desglosa en diferentes fases y sub-procesos para brindar una visión comprensiva de los impactos. Además, se incluyen varios indicadores de impacto ambiental medidos en unidades específicas para cada sub-proceso. Estos indicadores ayudan a cuantificar las implicaciones ambientales de usar un determinado tipo de hormigón, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final o reciclaje.

Fase del Ciclo de Vida ⁶⁶	Sub-Proceso ⁶⁷	Indicadores de Impacto Ambiental ⁶⁸	Unidades ⁶⁹
Extracción de materiales	Minería de caliza	Emisiones de CO2	kg de CO2
	Minería de arcilla	Emisiones de CO2	kg de CO2
	Extracción de arena	Consumo de agua	m ³
Producción	Trituración y molienda	Emisiones de CO2	kg de CO2
	Mezcla de componentes	Emisiones de CO2	kg de CO2
	Calentamiento	Energía utilizada	kWh
	Enfriamiento	Energía utilizada	kWh
Transporte	Hacia el sitio de construcción	Emisiones de CO2	kg de CO2
	Hacia el sitio de construcción	Consumo de combustible diesel	Litros
Uso en la estructura	Mantenimiento anual	Emisiones de CO2	kg de CO2
	Mantenimiento anual	Consumo de agua	m ³
Reciclaje o desecho	Proceso de reciclaje	Emisiones de CO2	kg de CO2
	Proceso de reciclaje	Residuos generados	kg
	Vertedero	Emisiones de metano	kg de CH4

Tabla 6 – Evaluación de Impacto Ambiental del Hormigón a través de SimaPro, desglosando el análisis por fases del ciclo de vida y sub-procesos. Fuente: Elaboración propia.

Este enfoque de múltiples capas para evaluar la sostenibilidad ambiental del hormigón se alinea con el objetivo más amplio del MEAP de crear sistemas de construcción más eficientes y responsables, que se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)⁷⁰ de las Naciones Unidas, proporcionando una base sólida para su inclusión en cualquier modelo de evaluación contemporáneo.

Economía y costos

Economía y costos representan aspectos cruciales en la elección de los criterios para cualquier proyecto de construcción. Se utilizó el BIM para una modelización financiera

⁶⁶ Se refiere a la etapa específica en la cual se evalúa el impacto ambiental del hormigón. Las fases típicamente incluyen la extracción de materiales, producción, transporte, uso en la estructura y reciclaje o desecho.

⁶⁷ Es una actividad específica que ocurre dentro de una fase del ciclo de vida.

⁶⁸ Estos son los diferentes aspectos ambientales que se miden para evaluar el impacto de un sub-proceso en particular.

⁶⁹ Las unidades de medida utilizadas para cada indicador de impacto ambiental.

⁷⁰ Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) son un conjunto de 17 metas globales establecidas por la Asamblea General de las Naciones Unidas en 2015, como parte de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Estos objetivos abarcan una amplia gama de asuntos sociales, económicos y ambientales, como la erradicación de la pobreza, el acceso a la educación, la igualdad de género, y la acción por el clima, entre otros. Los ODS ofrecen un marco común para que los gobiernos, las empresas y la sociedad civil trabajen conjuntamente en la resolución de los desafíos más apremiantes del mundo. En el contexto de la construcción y la sostenibilidad, los ODS relevantes podrían incluir el Objetivo 11 (Ciudades y Comunidades Sostenibles), Objetivo 12 (Producción y Consumo Responsables) y Objetivo 13 (Acción por el Clima). Al alinear los proyectos y métodos de construcción con estos objetivos, las empresas pueden contribuir significativamente a la agenda global de sostenibilidad.

detallada que permitió realizar estimaciones de costos a lo largo de todas las fases del proyecto.

La ventaja de integrar BIM en la modelización financiera radica en su capacidad para actualizar costos en tiempo real a medida que se desarrolla el diseño del proyecto, y permite una evaluación de los costos asociados a diferentes tipos de hormigón y otros materiales. Permite incorporar en el modelo financiero costos de materiales, mano de obra, tiempo de construcción y mantenimiento futuro, que se pueden actualizar en tiempo real. Utilizando BIM, el MEAP puede ofrecer un análisis de cómo los costos directos e indirectos impactan en la rentabilidad general del proyecto, eficaz para evaluar la viabilidad económica de las decisiones de diseño.

Aspectos logísticos

Los aspectos logísticos son vitales en cualquier proyecto de construcción, más aún cuando se emplean elementos producidos en fábrica distantes del obrador, lo que incluye ciertos métodos de fabricación remota. Tiene un impacto directo en los costos del proyecto, afectan los tiempos de ejecución y la calidad de la obra. En el MEAP, se incorporó el software Revit para simular y coordinar el flujo de la construcción. Revit es una herramienta potente para la modelización de información de construcción (BIM), especialmente útil para planificar y gestionar aspectos logísticos. Puede ayudar a organizar el flujo de materiales desde el proveedor hasta el sitio de construcción, coordinar el trabajo entre diferentes subcontratistas, y gestionar el tiempo y los costos del proyecto. También ofrece funcionalidades como el seguimiento del tiempo y la programación de la construcción, lo cual es crucial para entender cómo los materiales y recursos se moverán a lo largo del proyecto. La interconexión entre el diseño 3D, la programación y los costos permite una visión integral del rendimiento esperado del proyecto.

El BIM también ofrece la ventaja de facilitar una comunicación efectiva entre los participantes del proyecto, desde proveedores y subcontratistas hasta equipos de construcción y gestión del proyecto. Esto garantiza una coordinación eficaz en el suministro de materiales prefabricados, respetando los plazos de entrega y optimizando el uso de recursos.

Flexibilidad de diseño

Nuestro objetivo de evaluar y promover a futuro la integración de sistemas prefabricados en proyectos de arquitectura civil hizo que la flexibilidad en el diseño resultara un criterio fundamental, por su aporte a la estética y la funcionalidad de los componentes modulares en la arquitectura contemporánea. Para abordar este desafío, el MEAP incorporó simulaciones computacionales avanzadas en ArchiCAD para evaluar cómo las piezas prefabricadas en hormigón podían adaptarse a distintas necesidades de diseño.

ArchiCAD es especialmente útil cuando se trata de modularidad, una característica clave en proyectos que utilizan hormigón prefabricado. La posibilidad de realizar cambios en tiempo real y visualizarlos instantáneamente permite un proceso de diseño más iterativo, donde ideas y modificaciones pueden ser probadas y ajustadas de forma continua. Esto mejora la eficiencia del proceso de diseño y asegura que el producto final cumpla con los más altos estándares de estética y funcionalidad. Estas simulaciones permitieron visualizar diferentes escenarios y ajustar los diseños en etapas tempranas del proyecto.

Seguridad

La seguridad fue analizada desde dos frentes críticos: estructural y ambiental. En términos estructurales, se abordó diversos factores: se evaluó la capacidad del hormigón para resistir condiciones climáticas extremas, poniendo a prueba su durabilidad y resistencia ante variaciones ambientales significativas; se consideró la inestabilidad potencial del terreno para prevenir fallos estructurales asociados con asentamientos diferenciales o condiciones geotécnicas adversas; se analizó la resistencia a la corrosión y al desgaste en contextos específicos, factores que influyen directamente en la vida útil de la construcción.

Desde una perspectiva ambiental, se analizó el diseño y protección del sistema MEP para minimizar los posibles riesgos asociados a incidentes eléctricos o a la contaminación del aire, y se consideraron normas de accesibilidad para anticipar y responder adecuadamente a situaciones de emergencia.

Mantenimiento

El mantenimiento adquirió relevancia en nuestra evaluación, impulsado por consideraciones económicas y compromisos con la sostenibilidad. A través de un análisis de las evaluaciones de ciclo de vida, profundizamos en los requisitos de mantenimiento a largo plazo, discerniendo cómo estos factores influyen en la selección de materiales. En la práctica, significó reflexionar sobre cómo la exposición a diversos factores ambientales y de carga – tales como la expansión térmica, la absorción de agua y el potencial de corrosión de los refuerzos internos – podría afectar la integridad del hormigón a lo largo del tiempo.

Además, desde una perspectiva económica, el enfoque analítico consideró cómo los costos asociados con estas intervenciones de mantenimiento se compararon con los beneficios a

largo plazo de seleccionar materiales quizás más costosos inicialmente, pero con menores necesidades de mantenimiento. Esta evaluación también incorporó la sostenibilidad, dado que un mantenimiento reducido puede significar menos consumo de recursos y menos desechos generados por reparaciones o sustituciones.

Integración con otros materiales

La integración con otros materiales se analizó mediante simulaciones de ensamblaje y pruebas de compatibilidad con otros elementos estructurales, como acero o madera, para garantizar el rendimiento óptimo del sistema constructivo en su conjunto. Estos ensayos simulados permitieron identificar y mitigar posibles puntos de debilidad donde los materiales podrían comprometer la integridad del sistema bajo ciertas cargas o condiciones ambientales.

Innovación y tecnología

Por último, la innovación y tecnología se consideraron imperativas para mantenerse competitivos en el campo de la construcción civil. Se mantuvo un ojo en los desarrollos tecnológicos, como la impresión 3D en hormigón y las tecnologías de sensor, y cómo estos podrían ser incorporados en sistemas constructivos prefabricados en hormigón. La inclusión de cada uno de estos criterios involucró a expertos en cada campo, junto con la revisión de literatura y estudios de casos anteriores, para asegurar decisiones informadas y basadas en datos.

En conjunto, estas métricas desempeñan un papel fundamental al proporcionar una evaluación equilibrada y completa de los sistemas constructivos prefabricados de hormigón, garantizando su optimización en términos de eficiencia, calidad, rendimiento y valor a largo plazo. Sin embargo, estas métricas no operan de forma aislada, sino que están estrechamente interconectadas, conduciéndonos al siguiente tópico: las métricas paramétricas, un componente que refina aún más nuestra comprensión y mejora la aplicación del modelo MEAP en la práctica.

Métricas paramétricas

Las métricas paramétricas agregan una capa adicional de complejidad y sofisticación a nuestra evaluación del sistema Astori. En lugar de medir diferentes aspectos del sistema de manera aislada, las métricas paramétricas nos permiten explorar las interacciones entre estas variables y cómo pueden optimizarse.

Un componente clave de estas métricas paramétricas es el Diseño Basado en Reglas, que utiliza reglas codificadas basadas en las propiedades y restricciones únicas del sistema Astori. Esto nos permite crear diseños intrínsecamente viables y eficientes con el sistema, reduciendo el tiempo y el esfuerzo necesarios para iterar y mejorar los diseños.

La Optimización Multiobjetivo es otra métrica paramétrica que nos permite múltiples consideraciones de diseño. En lugar de limitarnos a un solo objetivo, como costos mínimos o tiempo de construcción mínimo, podemos buscar soluciones que logren equilibrio entre múltiples objetivos.

La Adaptabilidad Paramétrica aprovecha la naturaleza flexible y adaptable del diseño paramétrico, permitiendo explorar cómo los diseños basados en el sistema Astori pueden

adaptarse a diferentes contextos y requisitos. Esto significa que podremos crear diseños más versátiles para satisfacer una gama amplia de demandas y condiciones.

Las herramientas paramétricas permitieron realizar simulaciones y análisis detallados: desde estudios estructurales hasta análisis de sombra y luz solar, pasando por simulaciones térmicas y acústicas.

En el contexto de esta tesis, el software SPMF (Ilustración 34) desempeñó un papel importante en este proceso de recopilación y análisis de datos dentro de las métricas paramétricas.

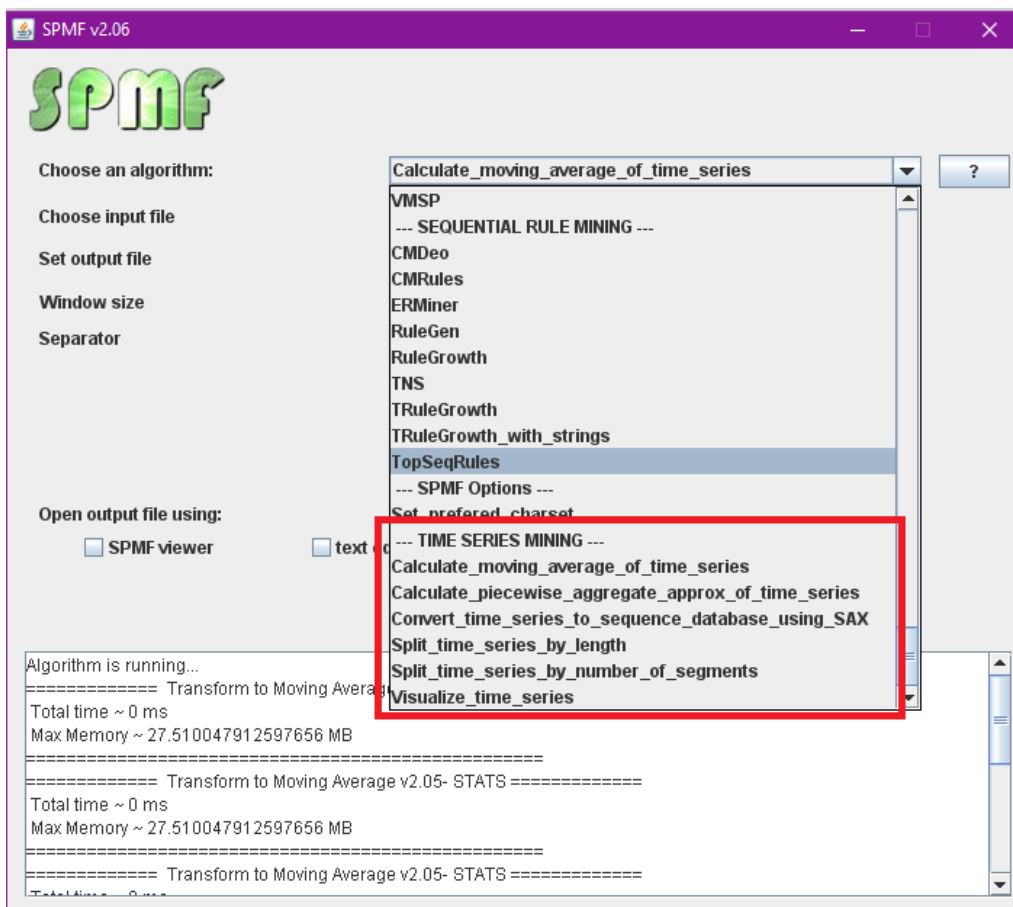
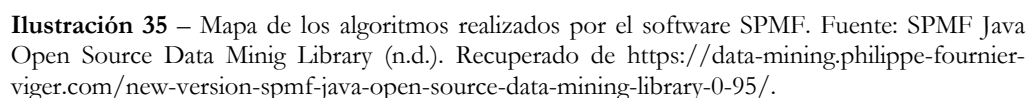


Ilustración 34 – Proceso de minería de datos del software SPMF. Fuente: SPMF Java Open Source Data Mining Library (n.d.). Fuente: SPMF



Esto resultó invaluable, ya que permitió identificar las secuencias de tareas que minimizaban el tiempo de construcción y maximizaban la eficiencia del proceso. El uso de SPMF también proporcionó una perspectiva sobre cómo las diferentes etapas de la construcción interactúan entre sí y afectan al rendimiento final del sistema constructivo. En resumen, el uso del software SPMF proporcionó una metodología efectiva para recopilar y analizar datos.

Procedimientos de revisión y mejora

En esta sección se destaca la importancia de la revisión continua y la mejora iterativa en el desarrollo y aplicación del modelo MEAP. Este proceso garantiza la relevancia de nuestras estrategias en un contexto donde la tecnología, las normativas y las expectativas de los clientes cambian con rapidez.

Esta etapa se basa en la retroalimentación constante, tanto de usuarios finales como de expertos en el campo, con el objetivo de evaluar y mejorar la eficacia de nuestro modelo. Estos procedimientos de revisión no se limitan a la etapa de post-evaluación, sino que se aplicaron durante todo el desarrollo del modelo para detectar problemas, facilitar su solución y evitar la acumulación de errores.

Tras su implementación inicial en el Sistema Constructivo de Viviendas de Astori, por ejemplo, recibimos comentarios sobre la complejidad de integrar el sistema MEP en los módulos prefabricados. Esta información nos llevó a modificar las recomendaciones de diseño para incluir cavidades predefinidas que faciliten estas instalaciones. Igualmente, en un encuentro con colaboradores de Astori en Córdoba⁷¹, los comentarios de los trabajadores reveló dificultades en el ensamblaje de los componentes prefabricados bajo

⁷¹ Reunión en la planta de Astori en Córdoba los días 9 y 10 de noviembre de 2017.

condiciones climáticas adversas. Como respuesta, se introdujeron ajustes en las tolerancias de los componentes al modelo para asegurar una instalación eficiente.

Otro aspecto que emergió durante las revisiones fue la necesidad de mejorar la coordinación logística para la entrega de materiales en lugares de difícil acceso. Según comentó Rodrigo Argañaraz, encargado de la planta Astori en Córdoba, el proyecto La Angelina, construido en 2016 en las sierras de Unquillo, presentó desafíos significativos en el transporte de módulos prefabricados. Esta situación nos impulsó a idear estrategias logísticas más sofisticadas, como la implementación de vehículos de transporte más compactos y la coordinación basada en el método just-in-time para asegurar un proceso constructivo más eficiente.

Estudios de caso: aplicación y análisis práctico del MEAP

Dentro del ámbito constructivo y arquitectónico, la implementación de modelos de evaluación requiere una comprensión teórica y una evaluación en escenarios reales. En este capítulo se analiza en detalle cada una de las etapas que conformaron el MEAP mediante su aplicación práctica en estudios de caso seleccionados: (i) Finca José Ignacio en Maldonado, Uruguay; (ii) Costa Urbana Shopping en la Ciudad de la Costa, Uruguay; (iii) Estadio Multipropósito Parque Roca en Buenos Aires, Argentina; (iv) Hotel Griffa en Rosario, Argentina; (v) Pabellón Verde en Córdoba, Argentina. Esta evaluación fue pensada para entender mejor cómo los sistemas Astori, aplicados en contextos propios de la arquitectura civil y sus edificios singulares, se desempeñan frente a estos parámetros. Los casos son altamente reconocidos por la crítica especializada debido a sus cualidades formales y originalidad, representando un espectro diverso de tipologías arquitectónicas.

Selección: datos de los estudios de caso

Nos sumergiremos, entonces, en la primera fase del MEAP (Ilustración 36), centrada en la selección de datos del modelo BIM. En cada caso, abordaremos datos generales y específicos, analizando su relevancia en el diseño, montaje y uso, y consideraremos las ventajas y limitaciones de emplear el sistema en cada proyecto.



Ilustración 36 – Primera etapa del MEAP: selección de datos. Fuente: Elaboración propia.

Finca José Ignacio (Maldonado – Uruguay)

FINCA JOSÉ IGNACIO	
Ubicación	Maldonado, Uruguay
Año de construcción	2012
Autor o equipo de diseño	Estudio Arqto. Marcelo Daglio
Área total del terreno	864 m ²
Área total construida	465 m ²
Numero de plantas	1
Orientación principal	Oeste / Este
Uso principal del edificio	Planta industrial para proceso de elaboración de aceites
Materiales predominantes	Hormigón, acero inoxidable, vidrio y Isopanel de Bromyros
Sistemas de construcción	Paneles de cerramiento liso Astori, y cerramientos metálicos
Tipos de espacios	Almazara, galpón para los tanques de acero inoxidable, embotellado, depósito de producto terminado, laboratorio, escritorio con baño, sector para el personal (vestuario y comedor) y un sector para la recepción y lavado de la aceituna
Instalaciones	Sistema de plomería industrial, eléctrico trifásico, ventilación mecánica, sistema contra incendios

Tabla 7 – Datos generales de la Finca José Ignacio. Fuente: Elaboración propia.

La Finca José Ignacio (Ilustración 37), situada en Maldonado (Uruguay), fue construida en 2012 y es obra del arquitecto Marcelo Daglio. Lo destacado del proyecto es su diseño, que va más allá de la simple función utilitaria de un sistema de sostén para explorar las potencialidades arquitectónicas de dicho sistema en la configuración de la forma. En este enfoque, la lógica constructiva se convierte en el principal medio de expresión, sirviendo como dato para comprender la estructura formal y sus capacidades. Es un ejemplo emblemático y sobresale por sus cualidades formales, introduciendo arte, proporciones áureas y calidad espacial a una fábrica.



Ilustración 37 – Finca José Ignacio. Fuente: Adaptado de Semanario Búsqueda, N°1848, 06 diciembre 2015.

El proyecto está localizado cerca de la costa. Debido a su proximidad al océano, experimenta una influencia climática marítima con vientos más constantes y predecibles que los vientos terrestres. La zona tiene un clima templado, temperaturas moderadas y una humedad elevada que influye en la elección de materiales y sistemas de ventilación.

El edificio corresponde a una planta industrial para proceso de elaboración de aceites y tiene una superficie total de 465m², la cual se divide entre las salas de producción y los espacios de servicios y apoyo técnico. Desde el punto de vista arquitectónico, el proyecto está dividido en dos sectores (Ilustración 38): un dedicado a la fábrica, donde ocurre la recepción de la aceituna, la elaboración y la bodega (destacado en rojo); y otro destinada a las áreas de apoyo (destacado en amarillo).

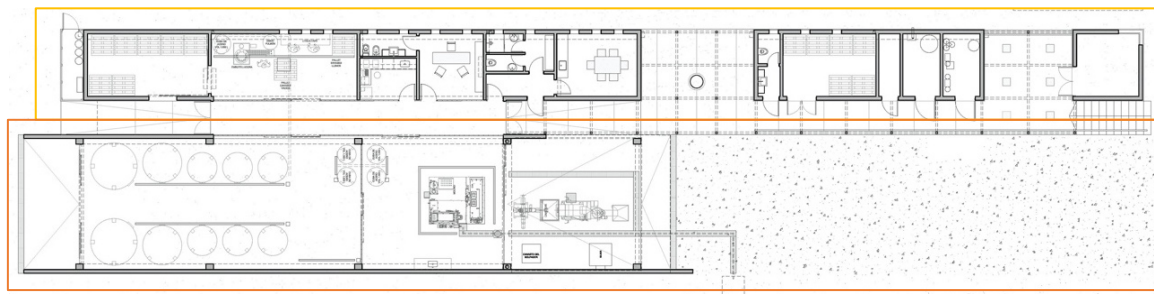


Ilustración 38 – Planta de la Finca José Ignacio (sector de la fábrica y de apoyo conectados). Fuente: Adaptado de Semanario Búsqueda, N°1848, 06 diciembre 2015.

Los dos sectores del proyecto presentan un tratamiento arquitectónico diferente, cada uno alineado directamente con la función específica que desempeña dentro del edificio. Cada área cumple una función concreta en el proceso de producción. Esta organización facilita la conexión entre áreas y promueve un flujo eficiente de actividades, reduciendo movimientos innecesarios y potenciando la operatividad. Algunas áreas se proyectan fuera de la línea principal del edificio, creando una sensación de movimiento y rompiendo la monotonía del diseño lineal.

Elaborado el modelo BIM, se recopilaron datos del proyecto con el objetivo de comprender su programa e integrarlo geográficamente de acuerdo con las condiciones ambientales del lugar. Se empleó el software Revit, reconocido en el campo de la AIC, logrando acceder a informaciones que reflejaban características del diseño y sus particularidades.

Centrándonos en los materiales, la combinación de hormigón, acero inoxidable, vidrio y Isopanel de Bromyros⁷² muestra una selección orientada hacia la resistencia y la longevidad. Estos materiales son conocidos por su capacidad para resistir condiciones industriales y factores ambientales. La envolvente se ve como un material de diseño, compuesta de placas de cemento con incrustaciones de vitrales de colores. El uso de paneles de cerramiento liso Astori y cerramientos metálicos también indica una elección basada en la facilidad y rapidez de montaje. Estos sistemas modulares son rápidos de instalar y pueden ofrecer un montaje más limpio y preciso.

⁷² El Isopanel de Bromyros es un material compuesto utilizado en la construcción que combina propiedades aislantes térmicas y acústicas con resistencia estructural. Está compuesto por dos láminas metálicas entre las cuales se encuentra un núcleo aislante, generalmente de poliuretano o poliestireno expandido.

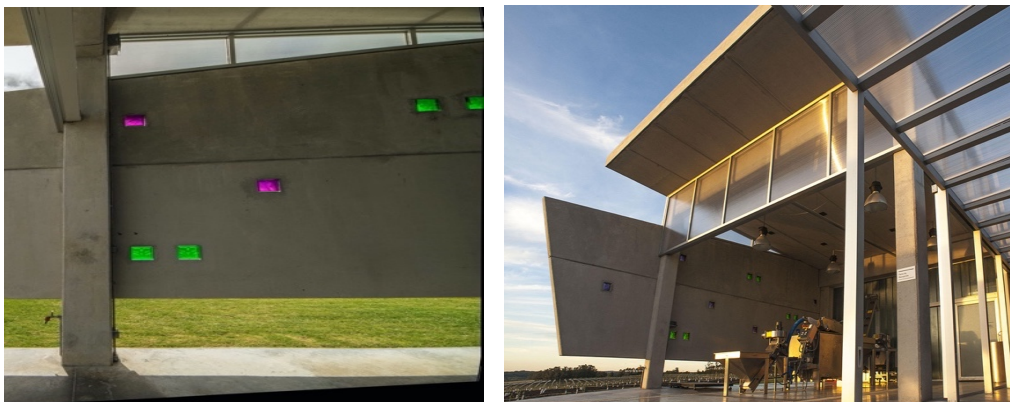


Ilustración 39 – Envolvente de la Finca José Ignacio. Fuente: Adaptado de Semanario Búsqueda, N°1848, 06 diciembre 2015.

El diseño del proyecto se orienta hacia el oeste y el este. Esta decisión responde directamente a la intención de maximizar la luz natural durante diferentes momentos del día, siendo la iluminación de la tarde un factor clave para ciertas áreas y actividades del edificio. La distribución de las aberturas hacia el este y el oeste, junto con las fachadas sólidas de hormigón hacia el norte y el sur, responden a las condiciones climáticas de la región.

Dado que la dirección principal del viento en la zona es del noreste (Ilustración 40), esta disposición de las fachadas protege el edificio de los vientos más fuertes y fomenta una ventilación cruzada eficaz entre las aberturas orientadas al este y al oeste. Esta estructura potencia la ventilación natural y reduce la dependencia de sistemas mecánicos, resultando en un diseño que no solo se adapta al entorno sino que también es sostenible. Gracias a estas características, ha obtenido reconocimiento internacional, recibiendo el premio del World Architecture Festival Awards en 2015⁷³, en la categoría Producción, Energía y Reciclaje.

⁷³ Este premio fue otorgado a la Finca José Ignacio, destacando su innovación y excelencia en diseño, en la categoría de Producción, Energía y Reciclaje. Premio World Architecture Festival Awards 2015. ArchDaily, 2015. Disponible en:

El edificio fue creado como una gran cáscara de hormigón con un tratamiento de ladrillos de vidrio de colores para generar distintas sensaciones en el interior. La estructura contiene al espacio, y su diseño constituye el núcleo de su valor. La cubierta se extiende hacia el exterior, en un voladizo que da la sensación de liviandad al edificio (Ilustración 40).



Ilustración 40 – Ingreso oeste de la Finca José Ignacio. Fuente: Adaptado de Semanario Búsqueda, N°1848, 06 diciembre 2015.

La arquitectura construida con elementos prefabricados, que conserva su carácter fundamental, es particularmente adecuada para materializar relaciones numéricas. En el caso de la finca, los elementos Astori consideran fundamentalmente la matemática de la producción industrial y la eficiencia, pero también de la belleza. La personalización de los paneles de cerramiento liso está determinada por generatrices que hacen referencia a la totalidad del volumen (Ilustración 41). Hay más de 200 ladrillos de vidrio violeta y verde colocados en proporción áurea⁷⁴, proporcionando fuentes de luz repartidas regularmente (Ilustración 44).

<https://www.archdaily.com/645332/shortlist-announced-for-world-architecture-festival-awards-2015>. Fecha de consulta: 14/03/2021.

⁷⁴ La proporción áurea se representa con un número algebraico irracional que dice representar relaciones que se encuentran en la naturaleza y el cuerpo humano; sabemos que traducen la relación entre dos segmentos de una línea, de modo tal que el segmento menor sea al segmento mayor como el segmento mayor es a la totalidad.

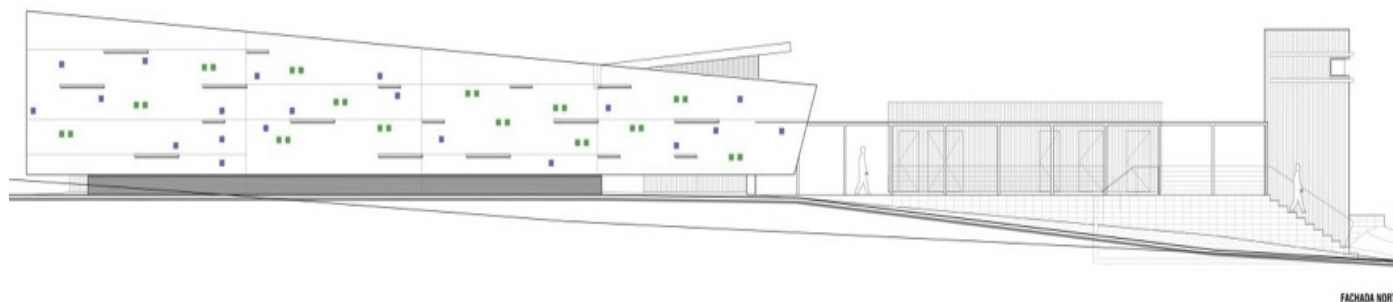


Ilustración 41 – Fachada norte del sector de la fábrica, ladrillos dispuestos en proporción aurea.
Fuente: ARQ / AR. Edificios industriales: Almazara Finca José Ignacio, 14 septiembre 2015.

Costa urbana shopping (Ciudad de la Costa – Uruguay)

COSTA URBANA SHOPPING	
Ubicación	Ciudad de la Costa, Uruguay
Año de construcción	2011
Autor o equipo de diseño	Guerra De Rossa Arquitectos
Área total del terreno	120,000 m ²
Área total construida	45,000 m ²
Numero de plantas	2
Orientación principal	Noreste
Uso principal del edificio	Centro comercial
Materiales predominantes	Hormigón, aluminio, acero inoxidable y vidrio
Sistemas de construcción	Sistema mixto Astori, sistema de muro cortina,
Tipos de espacios	Salas de cine, 70 locales comerciales, farmacia, plaza de comidas, casas de cambio, centro cívico - que incluye oficinas de telecomunicaciones, oficinas de transmisiones eléctricas, oficinas de obras sanitarias, dirección general impositiva y agencias de bancos de previsión social, seguros del Estado y el Banco República; oficinas del Correo Uruguayo, Intendencia de Canelones, alcaldía del municipio de la Ciudad de la Costa.
Instalaciones	Sistema de plomería, eléctrico trifásico, climatización, sistema contra incendios, sistema de energía de respaldo, sistema de sonido y comunicación.

Tabla 8 – Datos generales del Costa Urbana Shopping. Fuente: Elaboración propia.

En la Ciudad de la Costa, Uruguay, el Costa Urbana Shopping (Ilustración 42) destaca como un ícono del paisaje urbano. Diseñado por el reconocido estudio Guerra De Rossa

Arquitectos en 2011, este complejo de dos niveles se extiende sobre 45,000 m² y consta de dos bloques interconectados por un puente. Se distingue particularmente por su enfoque estructural, empleando el sistema mixto de Astori, el cual permitió la creación de amplias luces para promover áreas abiertas y versátiles. Otro aspecto notable es la interacción con diferentes elementos, especialmente el vidrio: el edificio presenta una imponente fachada vidriada de 12,000 m², particularidad que llevó a un análisis sobre la adaptabilidad del sistema al incorporar distintos materiales.



Ilustración 42 – Costa Urbana Shopping. Fotografía. Recuperado de <https://media-cdn.tripadvisor.com/media/photo-s/09/55/6d/35/costa-urbana-shopping>.

El shopping está ubicado geográficamente cerca de Montevideo, la capital del país. Esta proximidad influyó en la logística de la obra: se empleó un sistema mixto, producido en una planta industrial y luego trasladado al sitio del proyecto para su ensamblaje. Esta ubicación también permitió el transporte de elementos más grandes, gracias a la ruta 101 que conecta la planta y el lugar de construcción. Situada cerca del Río de la Plata, la Ciudad de la Costa (Ilustración 46) enfrenta alta humedad y constantes vientos. Estas condiciones

climáticas, junto con la necesidad de espacios amplios, llevaron a la elección del sistema mixto en la edificación, ofreciendo resistencia y durabilidad en el entorno.

El programa de la obra destaca por su carácter multifuncional y estratégico en el contexto urbano. Situado a ambos lados de la avenida Giannattasio, el proyecto alberga oficinas públicas, 70 locales comerciales y áreas de recreación techadas y al aire libre. Un elemento distintivo de este proyecto es su puente aéreo (Ilustración 43), que no solo une las dos partes del complejo, sino que también le confiere una identidad arquitectónica única.



Ilustración 43 – Modelo 3D del Costa Urbana Shopping representando el puente aéreo que conecta los dos volúmenes del edificio. Fuente: Revit.

La orientación del viento predominante que proviene del norte-noreste influyó en las decisiones arquitectónicas. Se diseñaron puertas principales que dan acceso a las salas de cine y a la plaza de comidas, aprovechando la brisa natural. Sin embargo, una parte considerable del diseño incorpora un muro cortina, que, aunque permite una iluminación natural, aumentó la ganancia térmica dentro del edificio, aumentando la necesidad de utilizar sistemas de climatización para mantener un ambiente cómodo.

El pilar en formato V (Ilustración 44) aportó dinamismo y modernidad al diseño, rompiendo con la linealidad tradicional. El sistema mixto Astori permitió la adaptabilidad en el diseño al incorporar el pilar en V, combinando durabilidad y estética en una solución contemporánea.



Ilustración 44 – Fachada del edificio Costa Urbana Shopping. Fuente: <https://www.astori.com.uy/arquitectura/item/costa-urbana.html>.

Complejo Multipropósito Parque Roca (Buenos Aires – Argentina)

ESTADIO MULTIPROPÓSITO PARQUE ROCA	
Ubicación	Buenos Aires, Argentina
Ano de construcción	2006, remodelado en 2018
Autor o equipo de diseño	GGMPU Arquitectos
Área total del terreno	60,000 m²
Área total construida	13,000 m²
Numero de plantas	2
Orientación principal	Norte - Noreste
Uso principal del edificio	Estadio
Materiales predominantes	Hormigón, acero inoxidable
Sistemas de construcción	Sistema Estadio – Tribunas de Astori
Tipos de espacios	Canchas, áreas de entrenamiento, vestuarios, espacios para prensa, zonas VIP
Instalaciones	Sistema de plomería, eléctrico trifásico, climatización, sistema contra incendios, sistema de sonido y comunicación, sistema de riego

Tabla 9 – Datos generales del Estadio multipropósito Parque Roca. Fuente: Elaboración propia.

Cruzando el Río de la Plata, en Buenos Aires (Argentina), el Complejo Multipropósito Parque Roca (Ilustración 45) resalta por la implementación del sistema Astori para Estadios - Tribunas. Inaugurado en 2006 y remodelado en 2018, este proyecto, diseñado por GGMPU Arquitectos, tiene capacidad para 16,000 espectadores y se concibió para albergar distintas actividades, demostrando la adaptabilidad de sus elementos.

Lo que destaca particularmente de este proyecto es que fue construido en un tiempo récord de solo 90 días. Este logro fue posible gracias al sistema constructivo de Estadios - Tribunas. Este sistema, especializado en la construcción de estadios, está diseñado para agilizar el proceso, minimizando tiempos y optimizando recursos. La prefabricación de componentes y la estandarización de partes facilitaron una montaje rápido y efectivo en el sitio.



Ilustración 45 – Foto de la construcción del Estadio Parque Roca Fuente: Summa+ N° 93, Estadio Parque Roca. 13 de abril de 2009.

Más allá de la eficiencia en el tiempo de construcción y la flexibilidad de usos, la estructura cumple con las exigencias de soportar cargas intensas y de resistir las vibraciones y movimientos de los eventos de gran envergadura. Fue diseñado principalmente para

albergar partidos de tenis, en particular la Copa Davis. Sin embargo, su versatilidad lo convirtió en un espacio para otros eventos deportivos y culturales. Además de la cancha principal, posee canchas auxiliares destinadas a entrenamientos y a encuentros de menor envergadura, con vestuarios, áreas para la prensa y zonas VIP. Su diseño, moderno y funcional (Ilustración 46), también garantizó la visibilidad desde cualquier ubicación.

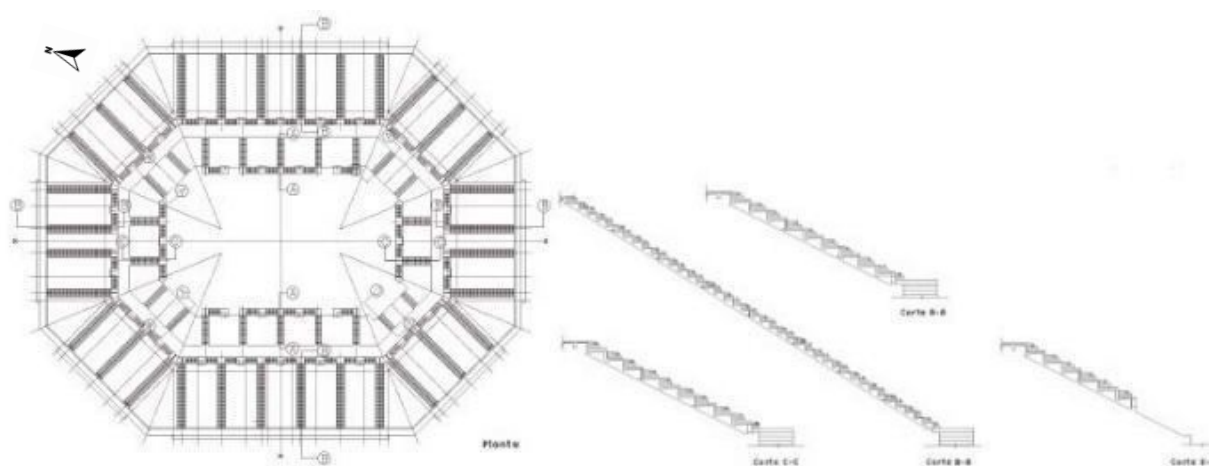


Ilustración 46 – Planta e cortes do Estádio Parque Roca. Fuente: Summa+ N° 93, Estadio Parque Roca. 13 de abril de 2009.

Dada su cercanía al río, el proyecto se encuentra bajo la influencia climática fluvial, con vientos más húmedos y variables que zonas interiores, influyendo en la elección de materiales de construcción resistentes a la humedad y en la definición de sistemas de ventilación y drenaje adecuados para el proyecto. La orientación del viento proviene principalmente de direcciones norte-noreste. Se diseñaron entradas y salidas estratégicas para aprovecharlo, sin embargo, dada su estructura y diseño, hubo áreas que, aunque ofrecen una excelente visibilidad y un diseño estético, tuvieron un impacto en la acumulación de calor, incrementando la necesidad de sistemas de climatización eficientes para asegurar el confort de los espectadores y deportistas.

Hotel Griffa (Rosario – Argentina)

HOTEL GRIFFA	
Ubicación	Rosario, Argentina
Año de construcción	2017
Autor o equipo de diseño	María Eugenia Bielsa y Pedro Soria
Área total del terreno	32,000 m ²
Área total construida	2,400 m ²
Numero de plantas	5
Orientación principal	Norte - Noreste
Uso principal del edificio	Hotel
Materiales predominantes	Hormigón, acero de carbono galvanizado
Sistemas de construcción	Sistema de cerramiento lisos
Tipos de espacios	Hotel, hall de espera, balcón terraza con parrillero, sala de juegos, oficina para el entrenador y para el cuerpo técnico, sala de usos múltiples, auditorio, sala de videos y vestuarios
Instalaciones	Sistema de plomería, eléctrico trifásico, climatización, sistema contra incendios, sistema de sonido y comunicación, sistema de riego

Tabla 10 – Datos generales del Hotel Griffa. Fuente: Elaboración propia.

Inaugurado en 2017 en Rosario, Argentina, el Hotel Griffa (Ilustración 47) sobresale por su eficiencia constructiva y diseño adaptable. Con 2,400 m² repartidos en cinco pisos y diseñado por la arquitecta María Eugenia Bielsa junto a Pedro Soria, este edificio multifuncional alberga desde un hotel hasta un auditorio, incluyendo diversas áreas recreativas y administrativas.

Se destaca también por la versatilidad del sistema de cerramientos lisos Astori y su integración con los demás materiales utilizados. La envolvente vertical está formada por placas lisas de hormigón a la vista, y las aperturas de aluminio y policarbonato. La envolvente horizontal está formada por paneles de entrepisos de hormigón y cielorraso de yeso. Hay una capa de aire de 5cm entre la estructura de entrepisos y el cielorraso.



Ilustración 47 – Hotel Griffa, Rosario (Santa Fe). Fuente: Clarín, 2020.

Dada su proximidad al río Paraná, se encuentra influenciado por un clima fluvial que presenta vientos húmedos y temperaturas más estables que en regiones alejadas de cuerpos de agua. Rosario tiene un clima templado con estaciones bien definidas: veranos cálidos e inviernos frescos, y una humedad relativamente alta debido a su cercanía al río. Estas condiciones climáticas determinan la elección de materiales de construcción que resistan la humedad, y sistemas de ventilación y acondicionamiento que se adecuen a las fluctuaciones de temperatura y humedad.

El proyecto tiene aproximadamente 2.400m², cuenta con cinco plantas y tiene una gran diversidad de instalaciones: hotel, balcón terraza, sala de juegos, oficina para el entrenador, oficinas para el cuerpo técnico, sala de usos múltiples, auditorio, sala de videos y vestuarios. Es un proyecto singular en el ámbito de la flexibilidad formal y funcional del sistema prefabricado de la empresa Astori.

En este caso específico, se realizó una evaluación de la envolvente vertical y horizontal de acuerdo con las leyes locales. Esta evaluación tuvo como objetivo determinar los aspectos

relacionados con el impacto ambiental y analizar el rendimiento del edificio. Cabe destacar que, en la ciudad de Rosario, la Ordenanza No. 8757/2011 exige el cumplimiento de los estándares IRAM referentes al desempeño térmico de las construcciones. Conforme indica la norma IRAM 11603 (2012), el proyecto se inserta en la zona bioambiental III a. La norma también establece las temperaturas medias en invierno y verano, detalladas en la Tabla 11.

ZONA		Ciudad	Provincia	Invierno (°C)			Verano (°C)		
				Tmin	Tmed	Tmáx	Tmin	Tmed	Tmax
III	a	Rosario	Santa Fe	6,50	12,20	17,90	17,20	23,27	29,30

Tabla 11 - Temperaturas media, máxima y mínima medias exigidas por la norma IRAM. Promedio de los meses de invierno y verano (°C). Fuente: IRAM 11603.

Para el recorte de este estudio, se consideró la sala de espacios múltiples ubicada en el primer piso del hotel (Ilustración 48). La elección del recorte se justifica por ser un área con un espacio múltiplo flexible, con envolvente vertical formada por paneles externos de hormigón, paneles internos de yeso y carpinterías de aluminio y policarbonato.

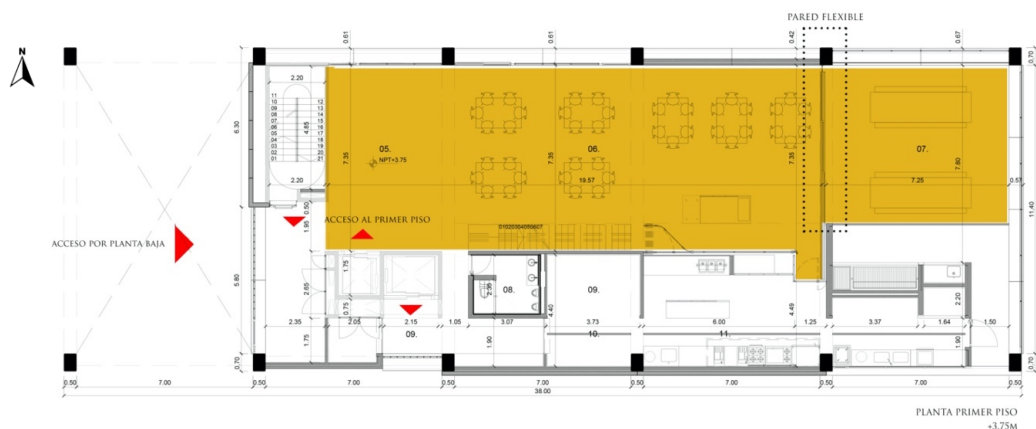


Ilustración 48 – Recorte del estudio. Planta del primer piso indicando en amarillo el recorte del estudio. En rojo se ve los accesos indicados Fuente: Elaboración propia.

Se llevaron a cabo simulaciones para determinar qué factores tienen mayor impacto en el rendimiento energético y para desarrollar estrategias ambientales adecuadas al clima local. En el aspecto de calefacción, los dos factores principales son la temperatura máxima de suministro (con un 40% de influencia) y la eficiencia en la recuperación de calor (con un 22,5% de influencia), como se muestra en el Ilustración 49. Por otro lado, en cuanto al enfriamiento, los factores predominantes son la temperatura preestablecida para enfriar (con un 58% de influencia) y la temperatura mínima para el proceso de enfriamiento (con un 22% de influencia), representados en la Ilustración 50.

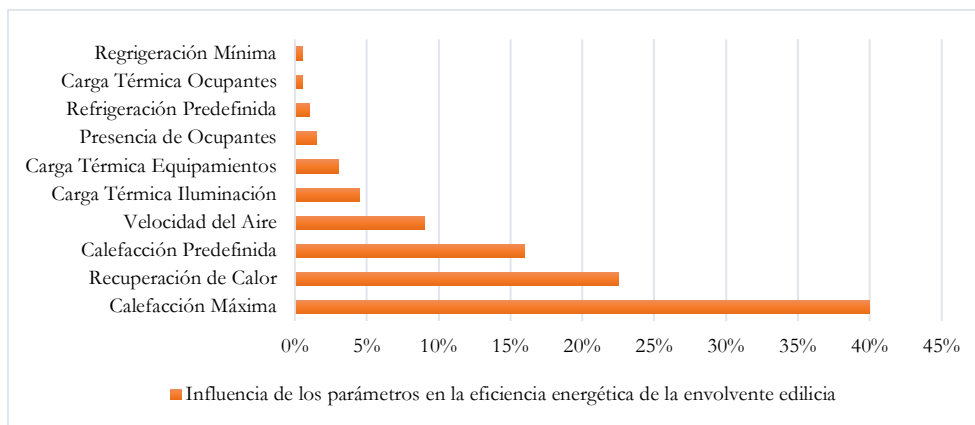


Ilustración 49 - Porcentaje de influencia de los parámetros de la envolvente edilicia en la eficiencia energética para la demanda de calefacción. Fuente: SPMF.

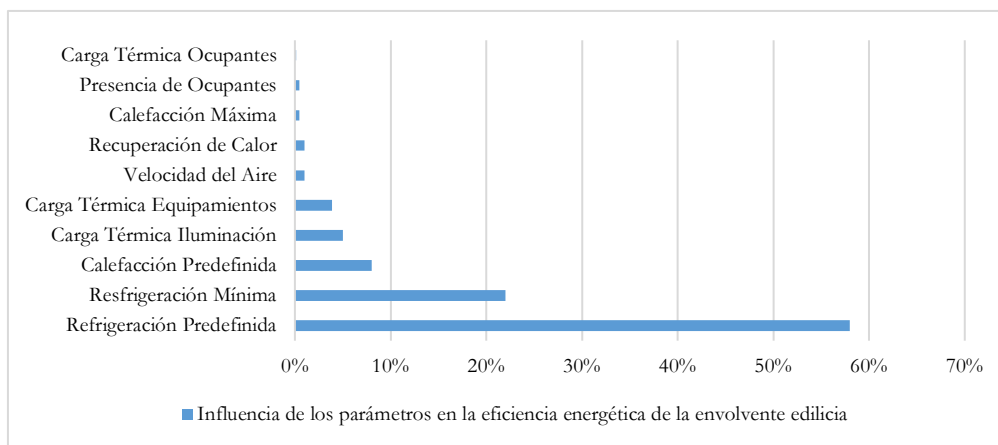


Ilustración 50— Porcentaje de influencia de los parámetros de la envolvente edilicia en la eficiencia energética para la demanda de refrigeración. Fuente: SPMF.

Los resultados fueron comparados con los requeridos por los estándares, y se verificó que de acuerdo con la transmitancia térmica máxima admisible para la condición de invierno (25°C) o verano (25°C), la envolvente vertical (muro) y la envolvente horizontal (techo) no cumplen con los niveles A de la norma IRAM 11605. Los resultados están detallados a continuación en la tablas 12:

NORMA IRAM 11605	Transmitancia térmica - envolvente vertical		
Capas del elemento constructivo	e m	λ W/m.K	R m ² .K/W
Resistencia superficial exterior	-	-	0,04
Tableros o paneles - De fibrocemento de 800 kg/m ³	0,120	0,300	0,400
Camara de aire no ventilada. Entre superficies no metalicas para paredes. Esp. 5 a 10 cm.	0,100		0,170
Tableros o paneles - De roca de yeso de 800 kg/m ³	0,125	0,370	0,338
Resistencia superficial interior	-	-	0,13
TOTAL			0,130
Transmitancia Termica del componente W/m ² .K		1/RT	0,93
Resistencia Termica			1,078
Cumple con la Norma IRAM 11605 (NIVEL A $\leq$ 0,5): SI/NO			NO

NORMA IRAM 11605	Transmitancia térmica - envolvente horizontal		
Capas del elemento constructivo	e m	λ W/m.K	R m ² .K/W
Resistencia superficial exterior	-	-	0,04
Losas premoldeadas huecas de hormigon de 16 cm de espesor	0,120		0,180
Camara de aire no ventilada. Una o ambas superficies metalicas para paredes. Esp.5 a 10 cm	0,05		0,340
Tableros o paneles - De roca de yeso de 600 kg/m ³	0,125	0,310	0,403
Resistencia superficial interior	-	-	0,13
TOTAL			0,130
Transmitancia Termica del componente W/m ² .K		1/RT	0,91
Resistencia Termica			1,093
Cumple con la Norma IRAM 11605 (NIVEL A $\leq$ 0,5): SI/NO			NO

Tabla 12 - Cálculo de la transmitancia y resistencia térmicas de la envolvente vertical y horizontal de paneles de fibrocemento, de acuerdo con la norma IRAM 11605. Fuente: IRAM 11603.

Como el mayor porcentaje se debe a climatización (refrigeración o calefacción), se propone el mejoramiento de la envolvente edilicia vertical y horizontal. Se sugiere incorporar una capa de aislamiento térmico de 10cm de espesor en la envolvente vertical y una capa de 5cm de espesor en la envolvente horizontal. Estas medidas fueron suficientes para cumplir con los niveles A de la norma IRAM 11605. Los valores están expresos en las tablas 13.

NORMA IRAM 11605	Transmitancia térmica – envolvente vertical		
Capas del elemento constructivo	e m	λ W/m.K	R m².K/W
Resistencia superficial exterior	-	-	0,04
Tableros o paneles - De fibrocemento de 800 kg/m ³	0,120	0,300	0,400
Aislantes térmicos – Filtro de lana de vidrio de 11 a 14 kg/m ³	0,100		0,170
Tableros o paneles - De roca de yeso de 800 kg/m ³	0,125	0,370	0,338
Resistencia superficial interior	-	-	0,13
TOTAL			0,130
Transmitancia Termica del componente W/m².K		1/RT	0,93
Resistencia Termica			0,31
Cumple con la Norma IRAM 11605 (NIVEL A ≤ 0,5): SI/NO			SI

NORMA IRAM 11605	Transmitancia térmica – envolvente horizontal		
Capas del elemento constructivo	e m	λ W/m.K	R m².K/W
Resistencia superficial exterior	-	-	0,04
Losas premoldeadas huecas de hormigon de 16 cm de espesor	0,120		0,180
Aislantes térmicos – Filtro de lana de vidrio de 15 a 18 kg/m ³	0,05		0,340
Tableros o paneles - De roca de yeso de 600 kg/m ³	0,125	0,310	0,403
Resistencia superficial interior	-	-	0,13
TOTAL			0,130
Transmitancia Termica del componente W/m².K		1/RT	0,50
Resistencia Termica			2,003
Cumple con la Norma IRAM 11605 (NIVEL A ≤ 0,5): SI/NO			SI

Tabla 13 - Cálculo de la transmitancia y resistencia térmicas de la envolvente vertical y horizontal de acuerdo con la norma IRAM 11605, después de la aplicación de medidas.

Pabellón Verde (Córdoba – Argentina)

PABELLÓN VERDE	
Ubicación	Córdoba, Argentina
Año de construcción	1978 remodelado en 2019
Autor o equipo de diseño	Luciani Arquitectos y Asociados
Área total del terreno	16,000 m ²
Área total construida	10,000 m ²
Numero de plantas	1
Orientación principal	Sudeste - Sur
Uso principal del edificio	Centro de convenciones
Materiales predominantes	Hormigón, acero inoxidable, panel vidriado, GRC
Sistemas de construcción	Sistema Pi
Tipos de espacios	Salón multipropósito para reuniones, congresos, convenciones, eventos y exposiciones feriales.
Instalaciones	Sistema de plomería, eléctrico trifásico, climatización, sistema contra incendios, sistema de sonido y comunicación

Tabla 14 – Datos generales del Pabellón Verde. Fuente: Elaboración propia.

El Pabellón Verde, en Córdoba (Argentina), se distingue por su diseño, durabilidad y adaptabilidad. Su estructura, construida en 1978, fue sometida a una transformación significativa en 2019 de la mano de Luciani Arquitectos y Asociados. El proyecto implicó la integración de una construcción moderna dentro de su esqueleto original, empleando materiales de vanguardia para su revestimiento interno y externo. Esta edificación multifuncional, con un área de 10,000 m² y capacidad para 1,500 personas, sobresale por su versatilidad. El uso del sistema Pi, complementado con un revestimiento de GRC, facilitó la creación de un espacio diáfano de 110 metros de longitud, con un control acústico optimizado.

La elección del Pabellón Verde como estudio de caso para esta tesis doctoral surgió a raíz de la significativa remodelación que experimentó en 2019. Esta intervención no solo fue

central para el desarrollo del trabajo, sino que también presentó una oportunidad única para evaluar en un escenario real y actual la aplicabilidad y el desempeño del sistema propuesto. Además, dado que se trataba de una remodelación y no de una edificación desde cero, el principal desafío consistió en combinar elementos nuevos con estructuras preexistentes, lo que permitió evaluar en profundidad la adaptabilidad y flexibilidad del sistema en cuestión.



Ilustración 51 – Pabellón Verde. Complejo Ferial Córdoba (Córdoba, Argentina). Fuente: Autora.

La región tiene un clima continental, con marcadas fluctuaciones térmicas entre el día y la noche, así como entre las estaciones. Dada esta característica, fue esencial optar por materiales resistentes y sistemas de ventilación adaptativos para garantizar el confort y la durabilidad del proyecto. Considerando que la dirección predominante del viento es del sudeste al sur y que la obra está en una zona expuesta a estas corrientes, la elección del revestimiento GRC no solo aportó una estética contemporánea, sino también una esencial protección contra el ruido externo.

El edificio, con su forma rectangular y muros de hormigón armado de 0,1 m de espesor, cuenta con 36 aberturas que aportan luminosidad al espacio. Su techo, hecho igualmente de hormigón armado, se sustenta en el sistema Pi y se complementa con un resistente piso de cemento.

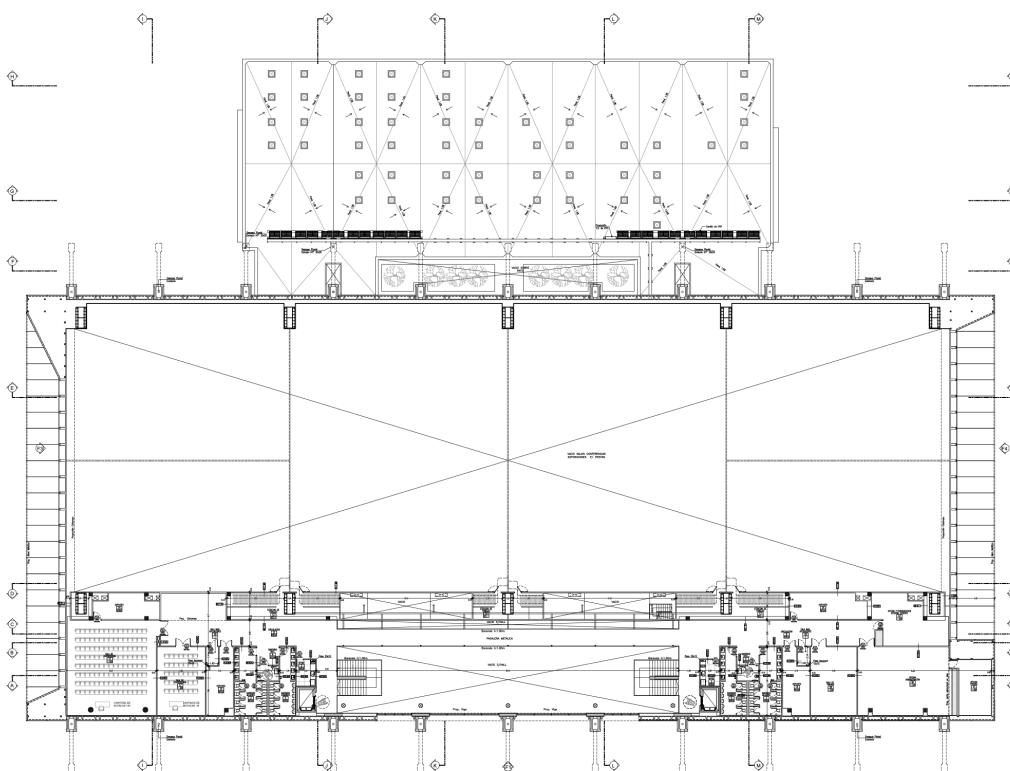


Ilustración 52 – Plano del Pabellón Verde. Complejo Ferial Córdoba (Córdoba, Argentina). Recuperado de <https://complejoferialcordoba.com.ar/espacios>.

Durante la remodelación, se profundizó en el diseño arquitectónico y su relación con la acústica al realizar un análisis con la Respuesta Impulsiva de un Recinto (RIR) siguiendo la norma ISO 3382, para identificar potenciales anomalías y garantizar un diseño acústicamente óptimo. Al comprender como se propagan las ondas sonoras, se pudo relacionar variables según la ubicación y los materiales constructivos. La adopción del sistema GRC, en este caso, sirvió para conferir al proyecto una acústica eficiente y adaptable a distintos usos.

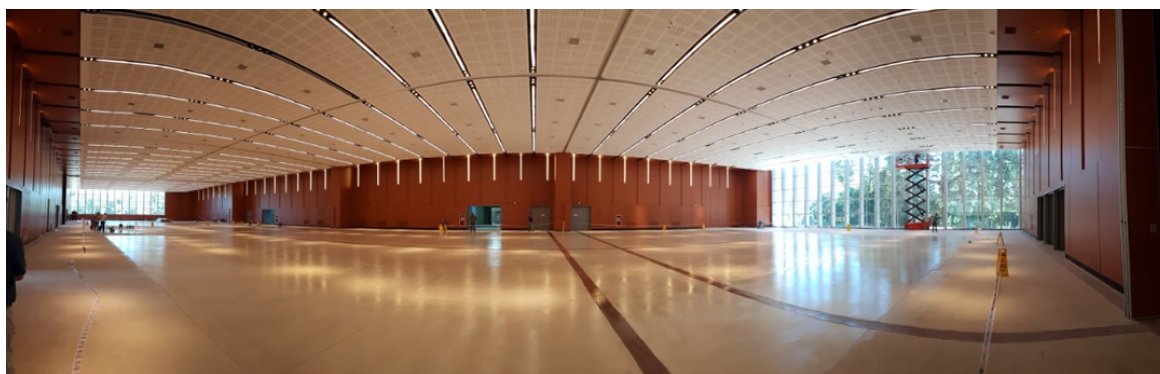
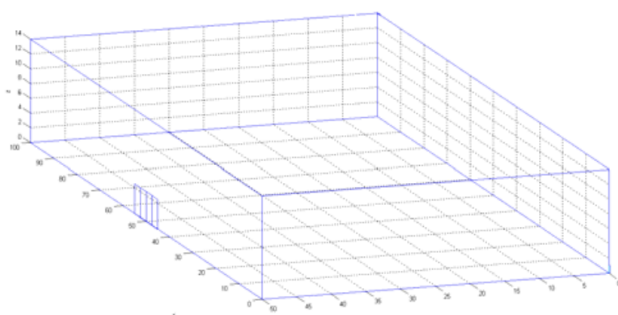


Ilustración 53 – SUM Pabellón Verde Complejo Ferial Córdoba: a) modelo computacional; b) fotografía exterior del recinto; fotografía después de la remodelación en 2019.

Preproceso: criterios de evaluación

Por lo tanto, avanzamos hacia la segunda fase del MEAP, donde nos enfocamos en el preprocesamiento de los datos (Ilustración 54). Esta etapa implica la conversión de la

información obtenida de los estudios de caso en variables comunes y relevantes, permitiendo una comparación coherente y significativa entre los casos.



Ilustración 54 – Segunda etapa del MEAP: preprocesamiento de datos. Fuente: Elaboración propia.

Más allá que nos hayamos detenido en ciertos aspectos de cada uno de los casos, posteriormente todos fueron evaluados con base en las mismas variables, elegidas debido a su impacto significativo en el rendimiento y la calidad de los elementos prefabricados. En el preprocesamiento, se eligieron 9: Tipo de Hormigón, Tamaño y Forma de los Elementos Prefabricados, Métodos de Unión, Tipo de Refuerzo, Técnicas de Acabado Superficial, Geometría y Disposición de los Elementos Prefabricados, Secuencia de Montaje y Procedimientos de Elevación, Sistemas de Anclaje y Fijación de los Elementos Prefabricados y Métodos de Transporte y Logística en la Entrega de los Elementos Prefabricados al Sitio de Construcción.

Tipo de hormigón

Se analiza la variable “tipo de hormigón” en cada uno de los elementos prefabricados utilizados en estudios de caso que juega un papel crucial en la calidad, resistencia y durabilidad de las estructuras. Para el Estadio Multipropósito Parque Roca, se llevó a cabo un análisis para determinar el tipo de hormigón más adecuado para las estructuras prefabricadas. Se consideró la resistencia requerida, la durabilidad, la exposición a

condiciones ambientales adversas y las características específicas del entorno de construcción. Tras una evaluación detallada, se optó por utilizar un hormigón de alta resistencia que cumpliera con los estándares de calidad y seguridad exigidos para un estadio de alto rendimiento, así como una mayor vida útil de las estructuras.

En el proyecto de la Finca José Ignacio, la selección del tipo de hormigón tuvo que ver con características geográficas y climáticas específicas. Considerando la proximidad al mar y la exposición a la salinidad, se optó por utilizar un hormigón con aditivos especiales que mejoraran la resistencia a la corrosión y minimizaran los efectos adversos del ambiente marino. Esto garantizó la durabilidad y la longevidad de los elementos prefabricados, protegiéndolos de los agentes corrosivos presentes en la costa.

En el Costa Urbana Shopping, se consideraron aspectos como la resistencia estructural, la durabilidad y la capacidad de respuesta a las demandas del entorno comercial. Se optó por un hormigón de alta resistencia, capaz de soportar las cargas pesadas y los requisitos de tráfico asociados a un centro comercial de gran escala. Además, se tuvo en cuenta la facilidad de mantenimiento del hormigón y su capacidad para mantener una apariencia estética de alta calidad, asegurando así la satisfacción de los clientes y usuarios del centro comercial.

En el Hotel Griffa, se consideró la resistencia requerida para garantizar la estabilidad estructural, especialmente en las zonas expuestas a cargas significativas, como los pilares y las losas. Se seleccionó un hormigón de alta resistencia que cumplía con los estándares de seguridad y ofrecía una mayor capacidad de carga. Además, se tuvo en cuenta la durabilidad del hormigón debido a la ubicación del hotel en una zona urbana con un alto nivel de exposición a factores ambientales y actividades humanas. Se optó por un tipo de hormigón con aditivos que mejoraban su resistencia a la corrosión y minimizaban los efectos negativos de los agentes agresivos presentes en el entorno urbano.

En el proyecto del Pabellón Verde, se buscó lograr una construcción sostenible y respetuosa con el medio ambiente. Se optó por un hormigón ecológico de baja emisión de carbono, que incorporaba materiales reciclados y alternativos en su composición. Esta elección tuvo como objetivo reducir la huella de carbono del proyecto y contribuir a la mitigación del cambio climático, sin comprometer la resistencia y la durabilidad del hormigón.

Tamaño y forma de los elementos prefabricados

En esta sección, se analizará la elección del tamaño y la forma de los elementos prefabricados Astori en cada uno de los casos y su papel en el diseño, ya que, más allá de afectar la eficiencia constructiva y la funcionalidad, todos reclamaban cierta singularidad y efecto estético.

En el Estadio Multipropósito Parque Roca, se consideraron el tamaño y la forma de los elementos para lograr una rápida ejecución del proyecto. Se optó por paneles prefabricados de gran tamaño para las gradas, lo que permitió acelerar el proceso de montaje y reducir el tiempo de construcción.

En la Finca José Ignacio, se prestó atención al tamaño y la forma de los elementos para lograr una perfecta integración con el entorno natural. Se utilizaron paneles de tamaño reducido y formas simples para permitir una armonía visual con el paisaje circundante. Esta elección también contribuyó a la estética, ya que se pudieron diseñar elementos personalizados con formas irregulares para crear espacios visualmente interesantes.

En el Costa Urbana Shopping, se tuvieron el tamaño y la forma de los elementos para optimizar el espacio comercial y la funcionalidad del edificio. Se utilizaron componentes de tamaño estándar y formas modulares para las paredes divisorias y las fachadas, lo que

permitió una fácil adaptación de los espacios interiores y la posibilidad de realizar modificaciones en el futuro.

En el Hotel Griffa, se consideraron el tamaño y la forma de los elementos prefabricados para lograr una estética contemporánea. Se utilizaron elementos de tamaño reducido y formas geométricas simples para las habitaciones, lo que permitió una rápida instalación y una adaptación eficiente a las necesidades del diseño.

En el Pabellón Verde, se tuvieron en cuenta el tamaño y la forma de los elementos para lograr una construcción sostenible y funcional. Se optó por componentes de tamaño estándar y formas simples para las paredes exteriores, lo que facilitó su producción en serie y su posterior montaje.

Métodos de unión

En esta sección, se analiza en detalle la variable “Métodos de Unión” y su relevancia en los estudios de caso seleccionados. Desempeñan un papel fundamental en la construcción de sistemas prefabricados, ya que garantizan la conexión y la integridad estructural de los elementos. Se examina cómo cada uno de estos proyectos eligió los métodos de unión, teniendo en cuenta factores como la resistencia, la durabilidad y la eficiencia constructiva.

En el Estadio Multipropósito Parque Roca, se utilizaron conexiones soldadas para asegurar la rigidez y la resistencia estructural de los elementos, debido a la necesidad de soportar cargas pesadas y proporcionar estabilidad durante eventos masivos. La soldadura se realizó de manera precisa y siguiendo las normas de calidad requeridas para garantizar una unión duradera y confiable.

En la Finca José Ignacio, se optó por anclajes mecánicos para unir los paneles, que permitieron una conexión segura y ajustable, facilitando su montaje y alineación precisa. Además, se tuvo en cuenta la resistencia a la corrosión.

En el Costa Urbana Shopping, se emplearon métodos de unión combinados, que incluyeron el uso de conexiones atornilladas y adhesivas. Permitieron una instalación eficiente y rápida de los componentes, al tiempo que garantizaron una unión resistente y duradera. La elección de métodos de unión versátiles y adecuados para cada situación específica al éxito del proyecto.

En el Hotel Griffa, se utilizaron sistemas de encastre, donde los elementos se acoplan y encajan entre sí. Esta elección se basó en la necesidad de un montaje rápido y sencillo, sin comprometer la resistencia y la estabilidad de la estructura. Los sistemas de encastre fueron diseñados y probados para garantizar una unión firme y confiable.

En el Pabellón Verde, se emplearon conectores metálicos y adhesivos estructurales. Permitieron una unión eficiente y resistente, a la vez que proporcionaron una mayor flexibilidad en el diseño y la disposición de los elementos. Esta elección versátil facilitó la adaptación del proyecto a requisitos funcionales y estéticos específicos.

Tipo de refuerzo

En esta sección, se examina en detalle la variable “Tipo de Refuerzo” y su importancia en los estudios de caso. El tipo de refuerzo desempeña un papel fundamental en la resistencia y capacidad de carga de las estructuras. Se analiza cómo cada proyecto abordó la elección del tipo de refuerzo, considerando aspectos como la resistencia, la durabilidad y la viabilidad económica.

En el Estadio Multipropósito Parque Roca, se utilizaron refuerzos de acero de alta resistencia para soportar grandes cargas y eventos masivos. En la Finca José Ignacio, se emplearon refuerzos de acero convencional basados en un análisis de los requisitos de carga, pero también en la disponibilidad económica de estas piezas.

En el Costa Urbana Shopping, se combinaron refuerzos de acero convencional y de alta resistencia, dependiendo de las zonas y elementos específicos de la estructura. El acero convencional se utilizó en áreas con cargas moderadas y el de alta resistencia, en zonas con cargas más exigentes. Esta selección permitió optimizar el diseño estructural y garantizar la resistencia requerida en cada caso. En el Hotel Griffa, también se optó por el refuerzo de acero convencional, que ofreció una excelente relación resistencia-peso y durabilidad, mientras que en el Pabellón Verde, se empleó acero de alta resistencia para proporcionar la capacidad de soportar grandes vanos.

Técnicas de acabado superficial

En esta sección, se examina la variable “Técnicas de Acabado Superficial”, centrándonos en las opciones de acabado liso, texturizado, colorido y con revestimiento. Estas técnicas juegan un papel determinante en la apariencia estética y la durabilidad de los elementos prefabricados.

En el Estadio Multipropósito Parque Roca, se empleó la técnica de acabado liso en sistema de Estadios – Tribunas, que proporcionó una superficie uniforme y pulida, resaltando su apariencia moderna. Además, se tuvo en cuenta su facilidad de limpieza y mantenimiento, asegurando la preservación de su estética a lo largo del tiempo. En la Finca José Ignacio también se optó por el acabado liso, motivada por la intención de crear una apariencia natural en armonía con el entorno. Este acabado resaltó cierta belleza orgánica y la integración con el paisaje circundante.

En el Costa Urbana Shopping, se aplicó una técnica de acabado colorido, ya sea a través de la pintura o de chapas metálicas. La elección se basó en la intención de dar vida y dinamismo a la estructura, como representación de lo comercial. Los componentes aportaron una estética vibrante y llamativa, captando la atención de los visitantes y creando un ambiente atractivo.

En el Hotel Griffa, se empleó un acabado liso en el exterior y una técnica de acabado con revestimiento en el interior. Esta opción permitió añadir capas adicionales de materiales con mejores propiedades térmicas o acústicas, dependiendo de la función del espacio. De la misma manera, el Pabellón Verde optó por un acabado con revestimiento en el interior debido a cuestiones acústicas, mientras que para el exterior se eligió un acabado colorido mediante pintura, con el objetivo de resaltar el espacio destinado a la realización de diversos eventos.

Geometría y disposición de los elementos prefabricados

En los casos, se consideró la geometría y disposición de los elementos prefabricados para asegurar la estabilidad estructural, la eficiencia constructiva y la estética del proyecto. Se analiza, entonces, la variable “Geometría y Disposición de los Elementos Prefabricados” en cuanto a paredes rectas, curvas, pilares rectangulares y pilares circulares. Esta geometría y disposición de estos elementos colabora con la funcionalidad, estética y eficiencia de las estructuras.

En el Estadio Multipropósito Parque Roca, se incorporaron piezas prefabricadas con geometrías de tribuna, optimizando el montaje, y se utilizaron tabiques rectos para una distribución uniforme de carga, brindando una estructura resistente y funcional.

En la Finca José Ignacio también se emplearon tabiques rectos, basados en la necesidad de crear estructuras singulares con apariencia ordenada y modular, permitiendo una fácil integración con otros elementos constructivos.

En el Costa Urbana Shopping, se emplearon pilares rectos y curvos. Los rectos se utilizaron en áreas de carga uniforme y en estructuras de soporte, garantizando la estabilidad y funcionalidad del centro comercial. Por su parte, los curvos, empleados en formato de “V”, sirvieron para dar soporte a la estructura voladiza y enfatizar la expresión visual de la estructura.

En el Hotel Griffa, se utilizaron pilares rectangulares, que brindaron una base sólida para la estructura, y permitieron una distribución adecuada de las cargas. También facilitaron la integración de otros elementos, como ventanas y balcones, en el diseño general del edificio.

En el Pabellón Verde, también se utilizaron pilares rectangulares, pero en la parte exterior de la envoltura, funcionando como un esqueleto que sostiene el volumen del edificio. Esta elección se basó en la búsqueda de una estética contemporánea, añadiendo un elemento distintivo al diseño.

Secuencia de montaje y procedimientos de elevación

En la construcción con sistemas prefabricados, la secuencia de montaje y los procedimientos de elevación de sus elementos desempeñan un papel importante en el proceso constructivo. Su correcta elección garantiza eficiencia, seguridad y calidad en la ejecución. Se aborda en esta sección la elección de la secuencia de montaje y los procedimientos de elevación en los casos.

En el Estadio Multipropósito Parque Roca, para asegurar una construcción eficiente y segura, se optó por un montaje horizontal, que permitió un control preciso de la alineación

de los elementos. Se utilizaron grúas y equipos especializados para levantar y colocar los elementos en su posición final.

En la Finca José Ignacio, debido a la complejidad de los elementos prefabricados, se optó por un montaje vertical utilizando grúas, permitiendo una instalación precisa y garantizando la estabilidad de los elementos. El proceso se realizó en etapas, asegurando la correcta secuencia y coordinación entre los componentes. Se implementaron medidas de seguridad adicionales, como el uso de anclajes temporales, para garantizar integridad de la estructura.

En el Costa Urbana Shopping, la elección de los procedimientos tuvieron en cuenta la magnitud y el peso de los elementos, recurriendo a un montaje vertical con grúa móvil. Esta técnica permitió una mayor flexibilidad en la ubicación de la grúa, al tratarse de un proyecto que tiene parte de su estructura sobre una avenida, y facilitó el montaje en diferentes áreas del proyecto. Se implementaron rigurosos protocolos de seguridad para garantizar la estabilidad de los elementos durante la elevación, y se contó con profesionales capacitados para supervisar y coordinar en cada etapa.

En el Hotel Griffa, se utilizó el montaje en voladizo para maximizar el espacio disponible en el sitio de construcción. Esta técnica requería una planificación detallada y el uso de equipos especializados para garantizar la estabilidad de los elementos durante la elevación. Se implementaron medidas de seguridad adicionales, como sistemas de sujeción temporal, para garantizar la integridad estructural durante el montaje.

En el Pabellón Verde, se optó por un montaje vertical con el uso de grúas para la instalación precisa de los paneles del sistema mixto. Se consideraron las limitaciones de espacio debido a la estructura ya existente en el proyecto y se implementaron medidas de

seguridad estrictas para garantizar la integridad de los elementos durante el proceso de elevación.

Sistemas de anclaje y fijación

En la construcción de edificaciones con elementos prefabricados, los sistemas de anclaje y fijación desempeñan un papel fundamental en la estabilidad y resistencia de la estructura. Aquí se abordan los métodos elegidos para garantizar la integridad de los elementos y su correcta unión con la estructura principal. El análisis consideró aspectos como resistencia química, adherencia y facilidad de aplicación de los anclajes químicos.

En el Estadio Multipropósito Parque Roca, se optó por anclajes metálicos para garantizar una unión robusta y segura. Se seleccionaron para proporcionar una conexión resistente, y se realizaron cálculos para determinar su ubicación precisa y su espaciamiento adecuado, asegurando una distribución equilibrada de las cargas y minimizando los esfuerzos concentrados. En Finca José Ignacio, se implementaron conectores de acero para una unión sólida y flexible, permitiendo la transferencia eficiente de cargas. Se realizaron cálculos y pruebas de resistencia para asegurar la idoneidad de estos conectores para asegurar la integridad de los elementos.

En Costa Urbana Shopping, dado que el proyecto presentaba requerimientos específicos de carga y estabilidad, se optó por utilizar anclajes químicos, que proporcionaron una conexión fuerte y duradera entre los elementos prefabricados y la estructura principal. Se realizaron pruebas de adherencia y se seleccionaron productos de alta calidad para adaptarse a las condiciones ambientales.

En el Hotel Griffa, se utilizaron tanto anclajes metálicos como conectores de acero, dependiendo de los requisitos de cada componente. Esta variedad se basó en la

consideración de las cargas, geometría y ubicación de cada elemento. Se llevaron a cabo cálculos estructurales detallados para determinar la ubicación óptima y el tipo de anclajes, utilizando los de acero para aquellos elementos que requerían una unión flexible y resistente a las deformaciones.

En el Pabellón Verde, se optó por utilizar una combinación de anclajes metálicos y conectores de fibra de carbono. Los anclajes metálicos se emplearon en áreas que requerían una conexión resistente y estable, mientras que los conectores de fibra de carbono se utilizaron en elementos que necesitaban una solución ligera y de alta resistencia.

Métodos de transporte y logística

En el contexto de la construcción con elementos prefabricados, la entrega eficiente y segura de los componentes al sitio de construcción es fundamental para el éxito del proyecto, garantizando la llegada oportuna y la correcta manipulación durante la descarga y almacenamiento temporal. En esta sección, se describe los métodos de transporte y logística utilizados, considerando la ubicación geográfica del sitio de construcción, la accesibilidad, el impacto en el entorno urbano y las necesidades particulares de cada proyecto. Además, se examinan las estrategias de planificación logística implementadas, incluyendo la definición de rutas óptimas, coordinación con proveedores de transporte, estudio de horarios y la implementación de medidas de seguridad durante el proceso de descarga y almacenamiento temporal de los elementos.

En el caso del Estadio Multipropósito Parque Roca, la empresa Astori optó por el transporte por camión para entregar los elementos al sitio. Dado que se encuentra en un área urbana densamente poblada, se requirió una cuidadosa planificación logística para minimizar el impacto en el tráfico y garantizar una entrega oportuna. Se definieron rutas eficientes y horarios de entrega ajustados a las restricciones de tráfico en la ciudad. Además,

se implementaron medidas de seguridad durante el proceso de descarga y almacenamiento temporal para garantizar su integridad.

En la Finca José Ignacio, se optó por el transporte por camión, una estrategia que permitió superar los desafíos logísticos inherentes a la ubicación remota del proyecto. A pesar de estar alejado de centros urbanos, se pudieron trazar rutas eficientes y directas, facilitando el acceso y la puntualidad en la entrega de materiales. En el Costa Urbana Shopping, los elementos también fueron transportados por camión desde la planta de fabricación hasta el sitio de construcción. Esto supuso una ventaja significativa, ya que existe una planta en Montevideo, ubicada cerca de la Ciudad de la Costa.

En el caso del Hotel Griffa, dado que el hotel se ubicaba en una zona urbana de Rosario, el transporte por camión fue la opción más conveniente. Se implementó una estrategia logística cuidadosa para optimizar las rutas de transporte y minimizar los tiempos de entrega. Se coordinaron los horarios de carga en la planta de fabricación con los horarios de recepción en el sitio de construcción, asegurando una sincronización eficiente. Además, se tomaron medidas de seguridad para proteger los elementos de posibles daños, con técnicas de sujeción adecuadas y considerando las condiciones de carga y descarga.

En el proyecto del Pabellón Verde, la ubicación del proyecto y la infraestructura vial disponible permitieron un acceso conveniente para los camiones de transporte. Se planificaron los tiempos de entrega según el tráfico local, considerando las restricciones de horarios de carga y descarga, y las necesidades de almacenamiento temporal en el sitio de construcción.

Transformación: clasificación de los casos

Las variables seleccionadas para el algoritmo fueron elegidas basándose en la experiencia adquirida a través de los estudios de caso, que proporcionaron valiosa información y conocimientos sobre las mejores prácticas y enfoques exitosos en la industria de estos elementos prefabricados. Cada variable importa en el diseño, y su elección adecuada puede tener un impacto significativo en la calidad y la durabilidad de las estructuras resultantes.

Con esto, alcanzamos la tercera etapa del MEAP (Ilustración 55), donde los datos recogidos se convierten en valores numéricos. Esta transformación es importante para que luego puedan ser procesados fácilmente por los algoritmos de minería de datos.



Ilustración 55 – Tercera etapa del MEAP: transformación de datos. Fuente: Elaboración propia.

La clasificación del tipo de hormigón tomó en cuenta la variedad de mezclas posibles acorde a los requisitos de resistencia, durabilidad y características específicas del proyecto. Los estudios de caso mostraron que diferentes proyectos requerían diferentes tipos de hormigón en función de las cargas, el entorno y otros factores relevantes. El tema de la elección del tamaño y la forma de los elementos prefabricados se basó en la optimización del rendimiento estructural y la eficiencia de construcción.

Los estudios de caso demostraron que el tamaño y la forma de los elementos prefabricados pueden influir en la resistencia, la estabilidad y la facilidad de instalación. Se observaron diferentes enfoques para adaptar este tamaño y forma a las demandas específicas de cada

proyecto, maximizando así su eficiencia y rendimiento. En cuanto a los métodos de unión, los estudios de caso revelaron la importancia de seleccionar técnicas adecuadas para garantizar la integridad y la resistencia. Se analizaron anclajes metálicos, anclajes químicos, conectores de acero y conectores de fibra de carbono, considerando la resistencia, la durabilidad y la facilidad de instalación.

La elección del tipo de refuerzo mostró la necesidad, a veces, de proporcionar refuerzos adicionales con barras de acero, mallas de fibra de carbono u otros materiales, en función de las cargas y las condiciones de diseño. Las técnicas de acabado superficial mostraron su importancia para lograr el aspecto deseado y cumplir con requisitos estéticos y de protección. Se evaluaron opciones como acabado liso, texturizado, colorido y con revestimiento, considerando la durabilidad, el mantenimiento y la apariencia visual.

La elección de la geometría y disposición de los elementos prefabricados mostraron diferentes configuraciones, como paredes rectas, paredes curvas, pilares rectangulares y pilares circulares, y cómo cada una se adaptaba a las demandas de cada proyecto. La secuencia de montaje y los procedimientos de elevación de los elementos también fueron considerados; se evaluaron opciones como el montaje horizontal, el montaje vertical con grúa, el montaje vertical con grúa móvil y el montaje en voladizo.

Cada proyecto enfrentó retos singulares debido a condiciones de acceso, limitaciones de espacio y restricciones propias del sitio. Estos factores determinaron la selección de la secuencia de montaje y los procedimientos de elevación, tomando en cuenta la capacidad de carga, durabilidad y sencillez en la instalación. Por último, la elección de los métodos de transporte y logística se mostró fundamental para garantizar una distribución oportuna. Se consideraron opciones como el transporte por camión, el transporte por barco, el transporte por tren y el transporte por avión.

Cada proyecto presentó diferentes requisitos en términos de distancia, accesibilidad y condiciones logísticas, influyendo en la elección del método de transporte más adecuado. La tabla 15 presenta una evaluación detallada de diferentes proyectos en base a diversos criterios relacionados con la construcción y funcionalidad de las estructuras. Cada proyecto ha sido evaluado en una escala del 1 al 5 para cada criterio, siendo 5 la puntuación máxima.

Criterio	Estadio Multipropósito Parque Roca	Finca José Ignacio	Costa Urbana Shopping	Hotel Griffa	Pabellón Verde
Resistencia Estructural	5	4	5	4	5
Durabilidad	5	4	5	4	3
Eficiencia Constructiva	3	4	5	3	5
Desempeño Térmico y Acústico	3	4	3	4	5
Sostenibilidad	5	4	5	5	5
Costo	2	4	2	2	3
Flexibilidad y Adaptabilidad	3	4	3	4	3
Calidad y Estética	5	4	5	5	5
Mantenimiento y Vida Útil	3	4	3	3	3

Tabla 15 – Evaluaciones cuantitativas utilizando los 9 criterios seleccionados. Fuente: Autora.

El Estadio Multipropósito Parque Roca se caracteriza por su robustez y longevidad, reflejado en sus altas puntuaciones en resistencia estructural y durabilidad. Además, demuestra un compromiso con el medio ambiente y una notable estética, obteniendo un 5 en sostenibilidad y calidad estética. No obstante, su principal reto es el costo asociado, reflejado en la puntuación de 2. La Finca José Ignacio mantiene una calidad uniforme en la mayoría de los aspectos evaluados, reflejando una puntuación de 4 en la mayoría de los criterios. Sin embargo, destaca en su compromiso con prácticas sostenibles, alcanzando el puntaje máximo.

Costa Urbana Shopping es reconocido por su durabilidad y métodos de construcción eficientes, logrando una puntuación de 5 en ambos criterios. A pesar de esto, es necesario

trabajar en la eficiencia de sus sistemas térmicos y acústicos, y en la gestión de costos, como lo sugieren sus puntuaciones de 2 y 3. El Hotel Griffa se distingue por su diseño y sostenibilidad, reflejado en puntuaciones máximas en estos criterios. Sin embargo, se observan desafíos en la metodología constructiva y en la eficiencia de costos, con puntuaciones de 3 y 2 respectivamente.

Por último, el Pabellón Verde muestra excelencia en áreas como resistencia estructural, eficiencia en la construcción, sostenibilidad y diseño. A pesar de estos logros, es esencial mejorar su durabilidad, como lo indica su puntuación de 3 en ese criterio. Es importante notar que la escala utilizada no solo proporciona una métrica cuantitativa, sino que también ha sido empleada por el SPMF para descubrir patrones y relaciones entre los distintos proyectos y criterios. Estos patrones pueden ayudar a identificar áreas de fortaleza y oportunidades de mejora en futuras construcciones.

Minería de datos: reglas de asociación y clustering

Hemos avanzado hasta la cuarta fase del MEAP (Ilustración 56), que se centra específicamente en la minería de datos, implicando el análisis y la extracción de información valiosa de grandes conjuntos de datos.



Ilustración 56 – Cuarta etapa del MEAP: minería de datos. Fuente: Elaboración propia.

Existen varios que demuestran los resultados del uso de la minería de datos en la gestión de proyectos de AIC. Cuanto mayor es el volumen de datos, más ventajosa es su implementación para analizarlos. La minería de datos proporciona medios (métodos y técnicas) para explorar la información y el conocimiento de las bases de datos con el fin de respaldar la toma de decisiones.

Para manipular y explotar grandes cantidades de datos, se requiere herramientas que satisfagan las necesidades operativas del modelado de conocimiento. En este estudio, para complementar las diversas formas de evaluación y análisis de los resultados, se eligió el software SPMF, que comprende varios algoritmos de preparación de datos, minería y validación de resultados, mediante dos instrumentos diferentes: (i) algoritmo FP-Growth (crecimiento de patrones frecuentes) y (ii) Clustering. FP-Growth es un algoritmo para descubrir conjuntos de ítems frecuentes en una base de datos de transacciones. Muy rápido y eficiente en memoria⁷⁵, está destinado a identificar reglas sólidas descubiertas en bases de datos. El clustering es la tarea de agrupar un conjunto de objetos de tal manera que los objetos en el mismo grupo (llamado clúster) son más similares (en algún sentido) entre sí que a los que están en otros grupos (clústeres).

Debido a su alto rendimiento y amplia aplicabilidad, el algoritmo FP-Growth se utilizó para encontrar conjuntos de elementos frecuentes relacionados con los elementos de construcción. En una actualización reciente del software SPMF el 8 de enero de 2019, se propusieron cálculos más rápidos y eficientes en memoria.

Para ingresar los datos en el SPMF, se utilizó un código binario para cada una de las variables y subvariables (Tabla 16). Por ejemplo, en la subvariable “Tipo de Hormigón”, se utilizó el código binario de un dígito, donde 0 representa el hormigón convencional y 1

⁷⁵ (Han, Pei, & Yin, 2000). *Mining frequent patterns without candidate generation*. Proceedings of the 2000 ACM SIGMOD international conference on Management of data. 1-12.

representa el hormigón de alta resistencia. De esta manera, se logra una representación numérica de todas las combinaciones posibles de subvariables para cada variable, lo que facilita su análisis y procesamiento.

Tipo de hormigón	
Código	Descripción
00	Hormigón convencional
01	Hormigón de alta resistencia
Tamaño y Forma de los Elementos Prefabricados	
Código	Descripción
00	Pequeños elementos con forma rectangular
01	Pequeños elementos con forma curva
10	Grandes elementos con forma rectangular
11	Grandes elementos con forma curva
Tipo de junta	
Código	Descripción
00	Encaje
01	Soldadura
10	Tornillos
11	Adhesivo
Tipo de refuerzo	
Código	Descripción
00	Acero convencional
01	Acero de alta resistencia
Técnicas de acabado superficial	
Código	Descripción
00	Acabado liso
01	Acabado texturizado
10	Acabado colorido
11	Acabado con revestimiento
Geometría y Disposición de los Elementos Prefabricado	
Código	Descripción
00	Pared recta
01	Pared curva
10	Pilar rectangular
11	Pilar circular
Secuencia de Montaje y Procedimientos de Elevación de los Elementos Prefabricados	
Código	Descripción
00	Montaje horizontal
01	Montaje vertical con grúa
10	Montaje vertical con grúa móvil
11	Montaje en voladizo
Sistemas de Anclaje y Fijación de los Elementos Prefabricados	
Código	Descripción
00	Anclajes metálicos
01	Anclajes químicos
10	Conectores de acero
11	Conectores de fibra de carbono

Métodos de Transporte y Logística en la Entrega de los Elementos Prefabricados al Sitio de Construcción	
Código	Descripción
00	Transporte por camión
01	Transporte por barco
10	Transporte por tren
11	Transporte por avión

Tabla 16 - Código binario para cada una de las subvariables.

Interpretación y evaluación

Tras haber codificado y minado los datos, avanzamos a la fase de interpretación y evaluación detallada de los resultados obtenidos (Ilustración 57. Los algoritmos PF-Growth y Clustering demostraron la relación intrínseca entre características específicas y decisiones técnicas en diversos aspectos esenciales. Al entrar en la etapa final del MEAP, nos enfocamos en la interpretación de los resultados obtenidos de la minería de datos. Con estos insights, proponemos recomendaciones para el diseño, montaje y uso del sistema prefabricado en hormigón, buscando optimizar su implementación y rendimiento.



Ilustración 57 – Quinta etapa del MEAP: interpretación y evaluación. Fuente: Elaboración propia.

Al analizar la eficiencia y sostenibilidad, la decisión de utilizar “Hormigón de Alta Resistencia” no solo favoreció un enfoque sostenible, sino que también demostró ser económicamente eficaz al reducir la cantidad de recursos necesarios. Esto tuvo como resultado una disminución en la energía incorporada y en las emisiones de carbono. Además, la estandarización en la producción de elementos prefabricados condujo a una

reducción notable de residuos, y la optimización de los métodos de transporte reforzó la sostenibilidad a lo largo de la cadena logística.

En el análisis detallado sobre confort y funcionalidad, las “Técnicas de Acabado Superficial” demostraron no solo mejorar la estética sino también tener un impacto directo en la acústica y la sensación térmica de los espacios internos, contribuyendo sustancialmente al confort general. Por otro lado, la “Geometría y Disposición de los Elementos Prefabricados” evidenció que una organización inteligente de estos componentes optimiza la funcionalidad de los espacios, permitiendo una mayor versatilidad.

Al profundizar en el aspecto de forma y estética, se identificó que la elección en las dimensiones y formas de los elementos prefabricados, a la que se le dio un peso considerable en varios estudios, tenía un impacto significativo en la estética arquitectónica. Estos diseños, enriquecidos por la diversidad de formas y tamaños, lograron realzar no solo la armonía con el entorno natural sino también la integración con el contexto social y cultural del lugar.

En relación con el montaje, se destacó la importancia de la “Secuencia de Montaje y Procedimientos de Elevación”. Estos factores, que recibieron un peso notable en varios estudios, resultaron ser cruciales para garantizar la eficacia en el lugar de construcción. Un ensamblaje meticuloso y bien planificado aseguraron que las estructuras fueran montadas de manera eficiente. En cuanto al uso y mantenimiento, se observó que la calidad del montaje influenciaba directamente la fase posterior de uso, reduciendo la demanda de mantenimiento. Como resultado, esto llevó a una disminución en los gastos continuos asociados, garantizando estructuras perdurables.

En definitiva, los hallazgos obtenidos de la minería de datos, complementados con los análisis técnicos del modelo BIM y las particularidades geográficas, potenciaron el proceso de diseño y fueron cruciales en la estructuración del MEAP. Posteriormente, se llevó a cabo una prueba piloto para validar y perfeccionar el modelo planteado. Los pormenores, resultados y su trascendencia para el proyecto se explican con profundidad en el próximo capítulo.

Validación: la prueba piloto del MEAP

El camino recorrido a lo largo de esta investigación nos ha llevado a profundizar en múltiples aspectos, herramientas y enfoques que convergen en el MEAP. Llegamos ahora a un punto clave en el desarrollo de esta tesis: la presentación y el análisis de las conclusiones surgidas de la implementación del MEAP en un entorno práctico. Nos enfocaremos en el análisis de la prueba piloto del MEAP, examinando los resultados obtenidos, su aplicabilidad y las implicancias que estos tienen en el ámbito de la construcción prefabricada.

Después de toda la preparación teórica y metodológica, la prueba piloto del MEAP tuvo lugar en la Escuela Nacional de Ingenieros de Tarbes (ENIT), Francia, bajo la supervisión del Dr. Bernard Kamsu Foguem, figura destacada en el ámbito de la investigación aplicada y con vasta experiencia en la intersección de la ingeniería y la gestión del conocimiento.

El desarrollo y la implementación de la prueba piloto en la ENIT adquieren aún más relevancia cuando consideramos que se realizó en el marco de la “Soutien à la Mobilité Internationale” (SMI). Esta iniciativa, que promueve la colaboración y el intercambio internacional, fue esencial para proporcionar las condiciones adecuadas para realizar la investigación en un entorno de alto nivel académico y técnico. El trabajo se desarrolló específicamente en el Laboratoire de Génie de Production del ENIT, una de las instituciones prominentes de la Université de Toulouse. Esta universidad, con su rica historia y compromiso con la excelencia en investigación, ofreció un entorno propicio para profundizar y validar las investigaciones realizadas en torno al MEAP.

A lo largo de la estancia en Francia, se consolidó la puesta en práctica de lo anteriormente desarrollado, y se estableció un enriquecedor diálogo con expertos del área, permitiendo ampliar perspectivas y profundizar el estudio. Teniendo en cuenta el MEAP, fue posible

observar la existencia de dos momentos interdependientes en el proceso: (i) la aplicación de los instrumentos de evaluación para la recopilación de datos sobre la condición del edificio, evaluación de aspectos comportamentales, funcionales, técnicos-ambientales y estético-formales; (ii) la sistematización de los datos obtenidos y análisis inferencial de los resultados de la investigación con el fin de fomentar reflexiones metodológicas para mejoras en el producto (edificio) y también en su proceso (diseño).

Recopilación de datos del modelo

Para probar la viabilidad de los métodos desarrollados, se seleccionó como estudio de caso una vivienda unifamiliar construida con sistemas prefabricados de la empresa Astori, ubicada en el departamento de Maldonado, Uruguay. Se trata de la Casa Nabuco (Ilustración 58), construida en 2015 y proyectada por el arquitecto Pablo Gagliardo. El proyecto abarca 280 m² y se destaca por la adopción del sistema constructivo de viviendas Astori (Ilustración 59).



Ilustración 58 – Fotos de la Casa Nabuco, en Maldonado, Uruguay. Recuperado de <https://www.archdaily.cl/cl/891481/casa-nabuco-pablo-gagliardo/5abad5a5f197cc664000005a-casa-nabuco-pablo-gagliardo>.

Esta construcción fue elegida debido a sus similitudes en relación con los objetos de investigación en BIM, así como al contacto previo con el proyecto, lo que facilitó la aplicación metodológica propuesta. También se consideró la carencia de residencias en

nuestros casos de estudio, lo que nos permitió introducir variables de análisis distintivas en el ámbito de las viviendas unifamiliares. Su propósito era identificar métricas e indicadores de rendimiento que sustentaran decisiones fundamentadas y permitieran un análisis de minería de datos.

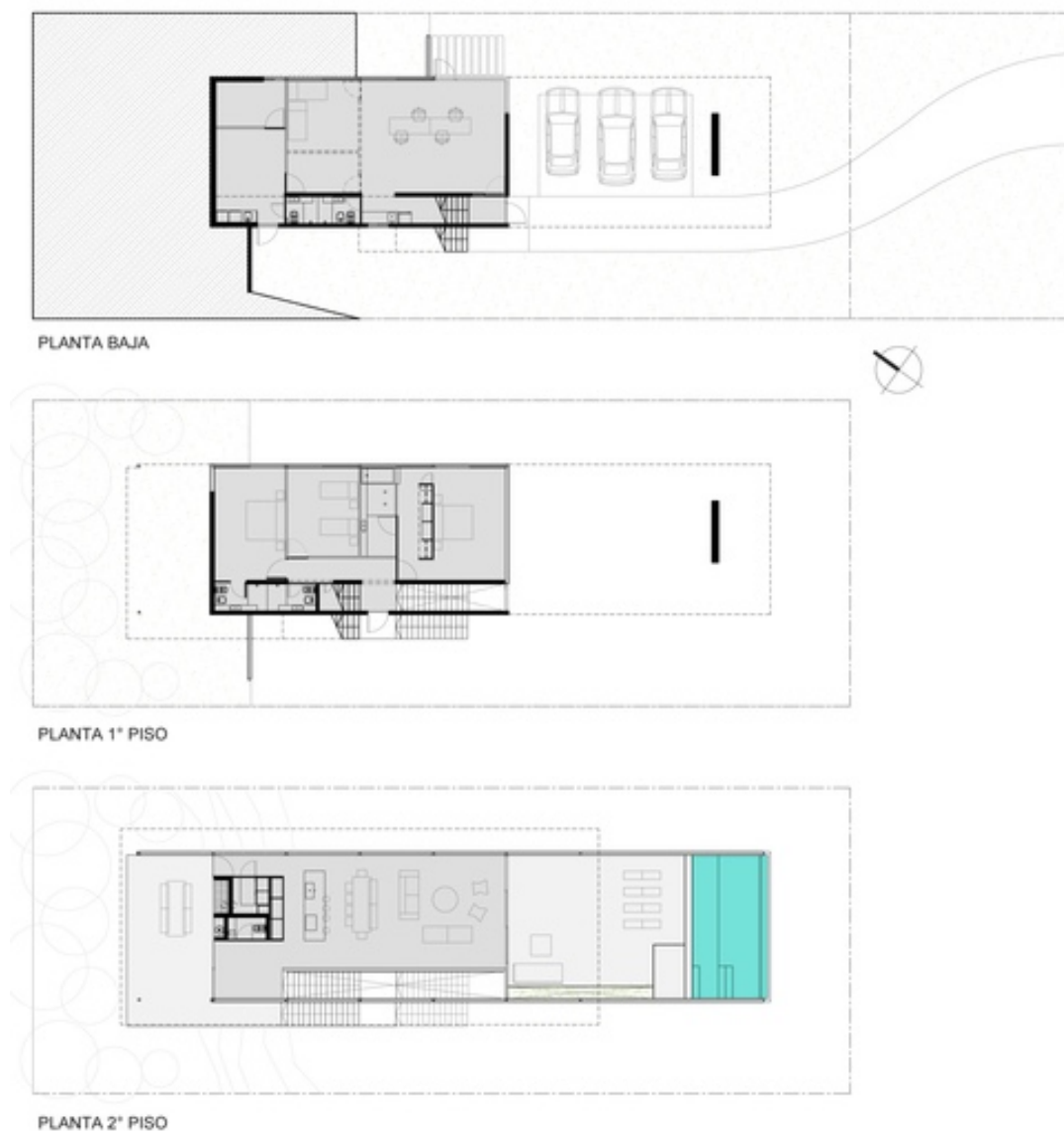


Ilustración 59 – Planos de la Casa Nabuco, en Maldonado, Uruguay. Recuperado de <https://www.archdaily.cl/cl/891481/casa-nabuco-pablo-gagliardo/5abad5a5f197cc664000005a-casa-nabuco-pablo-gagliardo>.

En el proyecto se empleó el hormigón de alta resistencia, teniendo en cuenta los grandes vanos de la planta libre y la necesidad de asegurar una estructura duradera. Los grandes elementos prefabricados con forma rectangular fueron seleccionados por su capacidad para ofrecer una estabilidad estructural y facilitar el montaje, logrando al mismo tiempo líneas limpias y un diseño contemporáneo.

La técnica de junta de encaje fue la opción para garantizar uniones precisas entre los elementos prefabricados, asegurando un ajuste entre las piezas y evitando filtraciones. A su vez, el acero de alta resistencia se incorporó en la estructura para proporcionar resistencia a las cargas y movimientos estructurales. El acabado liso en las superficies de hormigón no solo otorga una apariencia uniforme y moderna, sino que también refleja eficientemente la luz natural, enriqueciendo los espacios interiores. Las paredes rectas, además de facilitar el montaje, maximizan el espacio interior y favorecen su distribución y organización.

El montaje vertical con grúa se mostró esencial para la manipulación y colocación de los grandes elementos, garantizando una construcción rápida y eficiente. La decisión de usar anclajes metálicos en la estructura brindó una fijación segura de los componentes, esencial para la estabilidad del conjunto. Considerando la logística y el transporte, llevar los elementos prefabricados al sitio de construcción mediante camiones resultó ser la solución más efectiva, asegurando que los componentes llegaran en las mejores condiciones y en los tiempos previstos.

Sistematización de datos y análisis

En el proyecto se implementó el SPMF para la minería de datos, enfocándonos específicamente en el algoritmo FP-Growth y en técnicas de clustering. A través del FP-

Growth, se identificaron patrones clave en la elección y combinación de materiales y técnicas constructivas. Este análisis permitió determinar qué elementos del sistema constructivo de viviendas Astori eran más prevalentes en conjunto y cuáles generaban los mejores resultados en términos de eficiencia y estabilidad. La base de datos utilizada para especificar los atributos relevantes del modelo BIM fue obtenida de las especificaciones técnicas del proyecto (Tabla 17).

Attributes	Room specification											
Room type	Bath	Hall	Kitchen & Dining	Laundry	Living	Bath	Bath	Bedroom	Bedroom	Entry Hall	Master Bath	Master Bedroom
Elevation	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
Orientation	N/A	North	Ouest	N/A	East	N/A	N/A	South	South	North	South	Ouest
Width	1.5	6.0	6.0	2.1	6.0	1.7	1.7	3.0	3.0	6.0	2.3	6.0
Length	1.8	6.0	11.8	2.4	11.8	2.4	2.4	4.5	4.5	10.4	3.2	6.0
Area	3.0	24.0	73.0	5.0	70.0	4.0	4.0	14.0	14.0	30.0	7.0	27.0
Height	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
Window surface	0.0	11.0	72.0	0.0	15.0	0.0	0.0	4.0	4.0	7.0	4.0	7.0
Number of fixtures	1	2	4	1	4	1	1	2	2	2	2	3
System type	C. L.	C. L.	C. L. L. H.	Modular	C. L. L. H.	Modular	Modular	C. L.	C. L.	C. L.	Modular	C. L. L. H.
Wall color	White	Wood	White matte	White	Wood	White	White	White matte	White matte	Wood	White	White matte
Ceiling color	White	White matte	White matte	White	White matte	White	White	White matte	White matte	White matte	White	White matte
Floor type and color	White ceramic	PVC grey	White ceramic	White ceramic	PVC grey	White ceramic	White ceramic	PVC grey	PVC grey	PVC grey	White ceramic	PVC grey
Window type	N/A	Double glazing	Double glazing	N/A	Double glazing	N/A	N/A	Double glazing	Double glazing	Double glazing	N/A	Double glazing
Glazing surface	0.0	11.0	72.0	0.0	15.0	0.0	0.0	4.0	4.0	7.0	4.0	7.0
Panel surface	9.0	61.0	147.0	15.0	195.0	12.0	12.0	38.0	38.0	83.0	17.0	74.0
Frame thickness	N/A	0.01 m	0.01 m	N/A	0.01 m	N/A	N/A	0.01 m	0.01 m	0.01 m	N/A	0.01 m
Wall material external	Concrete	Concrete	Concrete	Concrete	Concrete	Concrete	Concrete	Concrete	Concrete	Concrete	Concrete	Concrete
Wall internal	Dry walls	Dry walls	Dry walls	Dry walls	Dry walls	Dry walls	Dry walls	Dry walls	Dry walls	Dry walls	Dry walls	Dry walls
Occupancy average	1	2	4	1	4	1	1	2	2	2	1	2
Ventilation type	Artificial	Natural	Natural	Artificial	Natural	Artificial	Artificial	Natural	Natural	Natural	Artificial	Natural

Tabla 17 – Especificaciones de cada uno de los ambientes de la prueba piloto. Fuente: SPMF.

Después de aplicar la minería de reglas de asociación al conjunto de datos, se extrajeron 820 reglas de 106 conjuntos de elementos frecuentes y 12 transacciones. Se utilizó un soporte mínimo del 40% y un umbral del 60%. Eso significa que se encontró un número considerable de reglas dentro de un número relativamente pequeño de transacciones, sugiriendo que hay patrones fuertes y consistentes en los datos analizados. Estos patrones

son valiosos porque pueden influir en las decisiones futuras sobre diseño arquitectónico, indicando tendencias o preferencias que podrían no haber sido evidentes sin este tipo de análisis. La tabla 18 muestra los resultados de la minería de reglas de asociación utilizando el algoritmo FP-Growth, presentando los patrones o relaciones entre elementos del conjunto de datos.

Itemsets	Support	Confidence
131 $\Rightarrow$ 210	#SUP: 6	#CONF: 1.0
140 $\Rightarrow$ 210	#SUP: 7	#CONF: 1.0
140 171 $\Rightarrow$ 131	#SUP: 6	#CONF: 0.8571428571428571
140 210 $\Rightarrow$ 36	#SUP: 5	#CONF: 0.0.7142857142857143
131 210 $\Rightarrow$ 202	#SUP:5	#CONF: 0.8333333333333334
131 $\Rightarrow$ 171 210	#SUP: 6	#CONF: 1.0
131 140 171 $\Rightarrow$ 210	#SUP: 6	#CONF: 1.0

Tabla 18 – Resultados de la minería de datos con el algoritmo FP-Growth en el software SPMF. Fuente: SPMF.

Los itemsets representan las reglas de asociación encontradas en los datos. Cada regla está compuesta por un conjunto de elementos a la izquierda del símbolo " $\Rightarrow$ ", que se denomina antecedente, y otro conjunto de elementos a la derecha, que se denomina consecuente. La interpretación es que si ocurre el antecedente, entonces es probable que también ocurra el consecuente.

Support (#SUP) es una métrica que indica cuántas veces una regla particular aparece en el conjunto de datos. En otras palabras, representa la frecuencia con la que ocurren juntos tanto el antecedente como el consecuente. Por ejemplo, la regla "131 $\Rightarrow$ 210" tiene un soporte de 6, lo que significa que los elementos 131 y 210 ocurren juntos en 6 transacciones del conjunto de datos.

Confidence (#CONF representa la probabilidad de que ocurra el consecuente dado que ha ocurrido el antecedente. Se calcula como el soporte de la regla dividido por el soporte del antecedente. Por ejemplo, para la regla "131 $\Rightarrow$ 210", la confianza es 1.0, lo que significa que siempre que el elemento 131 esté presente, el elemento 210 también lo estará.

La prueba del cálculo se genera calculando el área marcada debajo de toda la curva del límite de un entorno y sumándolas (calculando un entero alrededor de un contorno cerrado). Para cada borde de un límite, se calculó un número de $(-Y * dX)$. Este número representa el área bajo un borde (el área entre un borde y el eje X). Las áreas resultantes son positivas si el borde va hacia la disminución de X, y negativas si va en la otra dirección. La parte superior del límite contribuye con un área positiva debajo de la parte superior del límite mientras que la parte inferior contribuye con un valor negativo al restar el área sobre la base. Para los segmentos lineales, las áreas marcadas se calculan como:

$$1/2 * (x0 - x1) * (y0 + y1)$$

En esta ecuación, $(x0, y0)$ y $(x1, y1)$ son las coordenadas del inicio del segmento y los puntos finales ordenados con respecto a la dirección antihoraria. Para segmentos de arco, las áreas marcadas se calculan como:

$$R * yc * (\cos a0 - \cos a1) + 1/2 * R^2 * (a1 - a0 + 1/2 * (\sin 2a0 - \sin 2a1))$$

En esta ecuación, yc es la coordenada y del centro del arco, R es el radio del segmento y $a0$ y $a1$ son los ángulos de inicio y finalización del arco respectivamente. Para los segmentos que no contienen arcos, las líneas rectas se calculan numéricamente. Se utilizan las siguientes convenciones de salida: (i) Cada entorno de salida es su propio sistema de coordenadas que se define para ser paralelo a las coordenadas XY del modelo, pero X la fuente se selecciona para ser la esquina izquierda de un entorno mientras que Y el origen está en la esquina inferior del entorno. (ii) Cada entorno se representa por una tabla

separada que contiene filas para cada borde del entorno. Si el entorno tiene bordes interiores, entonces los bordes de ellos siguen los bordes exteriores del entorno en la misma tabla. Para cada borde, hay una fila de tabla que contiene un tipo de segmento, área bajo este borde, X e Y del punto de inicio, X e Y del punto final. Si el borde es un arco circular, entonces la línea contiene el radio, la coordenada Y del centro y los ángulos de arco inicial/final medidos desde el eje X.

Dentro de las reglas extraídas, algunos patrones destacaron con una claridad particular: la elección del hormigón de alta resistencia está directamente relacionada con la inclinación del terreno, garantizando así la estabilidad y durabilidad de la estructura en pendientes pronunciadas. Se evidenció que los elementos prefabricados grandes de forma rectangular facilitan la ventilación cruzada y optimizan la orientación de la fachada, maximizando la entrada de luz natural.

Las reglas también señalan que la combinación de soldadura y tornillos, como métodos de unión, responde a la necesidad de una estructura segura, resistente a fuerzas laterales como el viento. Además, el acabado texturizado y con revestimiento no solo es una elección estética, sino que también tiene una función protectora frente a las condiciones climáticas del lugar. El uso predominante de paredes rectas y pilares rectangulares, se identificó como una solución que favorece espacios internos amplios, promoviendo la ventilación cruzada y una distribución óptima del aire.

El montaje vertical con grúa y en voladizo resultó ser la opción predilecta, dadas las características topográficas del terreno y el deseo de minimizar el impacto ambiental. La decisión de transportar los elementos prefabricados por camión se interpretó como la más adecuada, considerando la accesibilidad y topografía del terreno. Estos patrones, presentes en las reglas extraídas, demuestran cómo las decisiones en el sistema constructivo de viviendas Astori están alineadas con el entorno y las demandas específicas del proyecto.

En la minería de datos, el clustering nos brindó una segmentación clara de los datos, identificando grupos de proyectos con características y elecciones similares. Esta segmentación es fundamental para comprender las tendencias y preferencias en el uso del sistema Astori, y para prever cómo ciertas combinaciones pueden comportarse en futuros proyectos.

Consideraciones finales

Tras concluir la fase de la prueba piloto del MEAP y emprender un análisis de los datos obtenidos, se desentrañan reflexiones y cuestionamientos en cuanto a la evaluación y optimización de los sistemas prefabricados. Es imperativo destacar que el reto principal no radica únicamente en la materialización de estas estructuras, sino en cómo se aborda su evaluación. La convergencia de múltiples variables, ya sean técnicas, medioambientales, estéticas o funcionales, demanda un abordaje meticuloso e interconectado de estas dimensiones. En este escenario, el MEAP pone en evidencia su potencial para navegar en este entramado de complejidades.

La prueba piloto resultó un espacio reflexivo sobre la dicotomía presente entre la teoría y la praxis en el campo de la construcción prefabricada. El despliegue de técnicas de minería de datos, cuando se contextualizan en la evaluación específica de edificaciones, deja al descubierto desafíos y oportunidades. Al aplicar técnicas de minería de datos, emergieron desafíos, como la diversidad de formatos y la inconsistencia en los datos recolectados, que a menudo provenían de diferentes fases del proyecto y de diversos actores involucrados.

Se añadía la complejidad de establecer parámetros para filtrar y procesar estos datos, garantizando que las simulaciones y análisis fueran coherentes y relevantes. En algunos casos, interpretar ciertos patrones o correlaciones que surgieron, especialmente cuando se

entrelazaban factores técnicos y de diseño, se convirtió en un reto. Además, la demanda de recursos computacionales para procesar extensos conjuntos de datos, al integrar modelos BIM detallados con simulaciones ambientales, representó otro obstáculo. Estos desafíos, lejos de representar meras barreras, se convirtieron en fuentes de aprendizaje, delineando tanto las restricciones como las potencialidades de las metodologías aplicadas. Para enfrentar estas situaciones, el MEAP propuso soluciones estratégicas.

El protocolo desarrollado para el proyecto MEAP se centró en la estandarización y homogeneización de los datos, con el objetivo de garantizar coherencia y precisión en el análisis. Estableció categorías definidas, formatos uniformes y criterios para el filtrado y la integración de la información. Además, priorizó la seguridad y la documentación detallada de cada etapa, asegurando que la información manejada estuviera en línea con los objetivos del proyecto y que el análisis resultante fuera confiable.

La adecuada selección de herramientas y programas informáticos también resultó primordial. En situaciones específicas, especialmente al utilizar el SPMF, se precisó modificar las configuraciones para alinearlas con los requisitos de la arquitectura civil. Asimismo, se promovieron encuentros de colaboración con especialistas de diversas áreas en el Laboratoire de Génie de Production, en la Université de Toulouse, con el propósito de interpretar y validar los patrones identificados.

Finalmente, la publicación de los resultados en la revista “Ecological Informatics” de Elsevier (Ilustración 65) no sólo refrenda la calidad y relevancia del trabajo realizado, sino que también subraya la importancia de compartir y someter a escrutinio público las investigaciones en esta área.



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Ecological Informatics

journal homepage: www.elsevier.com/locate/ecolinf

BIM-oriented data mining for thermal performance of prefabricated buildings

Lucianne Casasanta Garcia^a, Bernard Kamsu-Foguem^{b,*}^a Universidad Nacional de Rosario (UNR), Calle Riobamba 220bis, Rosario, Santa Fe, Argentina^b Laboratoire Génie de Production, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, 47 Avenue Azereix, BP 1629, F-65016 Tarbes, Cedex, France

ARTICLE INFO

Keywords:

Data mining
Association rules
Clustering
Building information
Green buildings

ABSTRACT

The use of energy efficiency procedures is a typical practice in building construction process that creates a huge amount of data regarding the building. This is particularly valid in structures which include complex collaborations, for example, ventilation, sunlight-based increases, inner additions, and warm mass. This paper proposes a new approach for automating building construction when improving their energy efficiency, aiming to foresee comfort levels based on Heating, Ventilating, Air Conditioning (HVAC), constructive systems performance, environmental conditions, and occupant behavior. More specifically, it presents a research work about thermal performance of prefabricated construction systems developed by an Argentine enterprise called Astori, using two Knowledge Discovery in Databases (KDD) processes to extract knowledge. In this context, Building Information Modeling (BIM) will give data to support the calculation to outline goal levels of a sustainable building performance concerning classification systems. The data were collected from a project in Uruguay referring to the construction systems and the energy efficiency of the building. The data mining tool SPMF was used to test the performance of classification and its use in prediction. Particularly, FP-Growth Algorithm and Clustering methodologies were used to analyze a combination of ambient conditions, in order to compare them using Revit© software. The results generated by these methods can be generalized for a set of buildings, according to the objective to be achieved concerning the thermal building performance.

1. Introduction

In recent years, the construction industry has experienced a sharp increase in the production of buildings using prefabricated construction systems. It is also known that civil construction has evolved every day, new constructive technologies arise with the purpose of optimizing processes and being less aggressive to the environment. As of late, the energy consumption in buildings experienced a significant increase as a result of enlarged demands for thermal comfort and the increasing number of electrical equipment used. In a period characterized by the gradual acceleration of global warming and economic and environmental decline, energy efficiency is a strategic vector for sustainability.

Clear comprehension of major impacting factors in performance-based building energy approach is an important procedure when determining thermal performance strategies. This production associated with the advancement of technology and the ability to digitally collect information increased the data and information storage of these buildings. The challenge may originate from a complexity of factors, such as climatic conditions or occupant behavioral patterns. Also, its

potential and its ability to adopt big data techniques have not been sufficiently studied (Oman, 2016). For this reason, construction was considered lagging behind the use of data technology compared to other industries. In order to manage this data, the introduction of BIM technology in the construction of operation and maintenance is currently in progress (Peng et al., 2017).

It's important to balance the maximization of building energy potency associated users' desired level of comfort whereas using an economical building management system. Therefore, BIM plays a key role in construction automation and corresponding management systems. Despite the capability of BIM sanctioning its potential observe throughout building lifecycle phases, designers-contractors centered totally on the appliance of BIM throughout design-construction management stages. Moreover, integration of knowledge management systems empowers handling and sharing of building maintenance information throughout the building lifecycle. This can be essential for post-construction property performance.

Much effort has been devoted to promoting the creation, sharing and integration of BIM as well as information and Knowledge

* Corresponding author.

E-mail addresses: lcasasanta@conicet.gov.ar (L.C. Garcia), bernard.kamsu-foguem@enit.fr (B. Kamsu-Foguem).<https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2019.02.012>

Received 13 November 2018; Received in revised form 24 February 2019; Accepted 28 February 2019

Available online 28 February 2019

1574-9541/ © 2019 Elsevier B.V. All rights reserved.

Ilustración 60 – Publicación de la prueba piloto en la Revista Ecological Informatics, de Elsevier.
Fuente: Ecological Informatics 51 (2019) 61-72.

La revisión por pares y la difusión internacional de las conclusiones y hallazgos garantizan que el MEAP no se quede en un ejercicio académico, sino que pueda influir y contribuir al desarrollo y mejora de la práctica profesional en la industria de la construcción.

El ejercicio de la AIC exige un prisma que integre, que diluya las fronteras entre disciplinas y que entienda que la verdadera innovación radica en la confluencia del conocimiento. Adoptar esta perspectiva integrada, pese a la resistencia y desafíos que pueda presentar, se postula como una oportunidad para forjar soluciones genuinamente transformadoras en el ámbito de la arquitectura y construcción contemporáneas.

The background is a dark, textured surface, possibly a wall or a piece of fabric, with a vertical light streak running down the left side. The texture is grainy and uneven, with some lighter patches and darker shadows. The light streak is a bright, diagonal band of light that cuts across the dark background.

ETAPA III

La Etapa III representa la culminación de un proceso en el que convergen los conocimientos adquiridos, las estrategias metodológicas y los resultados obtenidos en las etapas anteriores. En ella, nos adentramos en el desarrollo de una herramienta innovadora y práctica: el plugin PREAPP. Este paso final materializa los frutos de la exploración y el análisis, y pretende brindar una solución concreta para la mejora y la optimización de los sistemas constructivos prefabricados en hormigón, con un enfoque particular en el sistema Astori.

El PREAPP postula como una respuesta a los desafíos y las demandas identificados en las etapas anteriores. Alimentada por el MEAP, pretende ser un recurso preciso para los profesionales del ámbito de la construcción, proporcionando un enfoque informado y eficiente para la toma de decisiones. A través de la integración de datos, análisis y recomendaciones, el PREAPP se diseña como una brújula orientadora en el proceso de implementación de sistemas prefabricados en hormigón, con la mirada puesta en el sistema Astori.

Este paso se desglosa en distintas dimensiones que reflejan la complejidad y la diversidad de los desafíos a los que se enfrentan los profesionales de la construcción. En primer lugar, se explora en detalle la arquitectura del PREAPP, desentrañando su estructura y funcionamiento interno. Cada componente de esta herramienta se presenta y se contextualiza en relación con los objetivos de la investigación, trazando una conexión sólida entre la teoría y la práctica. Además, se detalla el proceso de desarrollo del PREAPP, destacando las decisiones clave, los ajustes y las iteraciones que dieron forma a su forma final.

Un aspecto básico de esta etapa es la validación del PREAPP, por el cual se somete la herramienta a una serie de pruebas y escenarios reales. Estos escenarios representan una variedad de contextos de construcción y aplicaciones del sistema Astori, lo que permite

evaluar la eficacia y la utilidad del PREAPP en situaciones del mundo real. Los resultados de estas pruebas se analizan y se interpretan, proporcionando una comprensión de cómo el PREAPP puede influir en la toma de decisiones y en la optimización de los sistemas prefabricados.

La integración del PREAPP en el ámbito de la arquitectura prefabricada también se explora en términos de su potencial impacto. Se considera cómo esta herramienta puede influir en la práctica profesional, en la educación y en la adopción generalizada de sistemas prefabricados en hormigón. Además, se examinan las implicaciones más amplias del PREAPP en el contexto de la industria de la construcción y en la búsqueda constante de mejoras en la eficiencia, la sostenibilidad y la calidad constructiva.

Desarrollo del plugin PREAPP

En este capítulo, se abordará el proceso de creación del plugin como producto final de la presente tesis doctoral. Este plugin puede representar un hito en el campo de la construcción de elementos prefabricados en hormigón, ya que busca proporcionar a los profesionales del diseño y la construcción una herramienta eficiente y efectiva para la toma de decisiones informadas en el proceso de diseño.

El desarrollo del PREAPP comenzó con una visión inicial de ofrecer un manual instructivo, centrado en las mejores recomendaciones para el diseño, montaje y uso de los sistemas prefabricados en hormigón. Sin embargo, con el tiempo se reconoció que tal formato podría limitarse a un público específicamente académico, reduciendo su alcance a una audiencia más restringida, compuesta principalmente por investigadores y profesionales especializados en el tema.

Con la intención de democratizar el acceso a la información y brindar herramientas prácticas a un público más amplio, desde estudiantes hasta profesionales experimentados, la idea de un simple instructivo evolucionó hacia la creación de una herramienta tecnológica. En ese contexto, surgió la propuesta de desarrollar un plugin compatible con Revit y ArchiCad, considerando la versatilidad que ofrecen ambas plataformas y su capacidad para abarcar diferentes sistemas operativos. Sin embargo, el desarrollo de un plugin nativo para estas plataformas suponía una serie de desafíos técnicos y burocráticos. Requeriría un profundo conocimiento en programación y adaptación a estas plataformas específicas, así como la complicación adicional de requerir a los usuarios descargar e instalar una herramienta adicional en su software.

Ante estos desafíos y buscando la máxima eficiencia y accesibilidad, se optó por innovar una vez más: la concepción de un plugin online. Esta solución no solo eliminaba la

necesidad de descargas adicionales y la adaptación a softwares específicos, sino que también ofrecía la posibilidad de un acceso universal, desde cualquier dispositivo con conexión a internet. Así, con un enfoque en la simplicidad y la intuición de uso, nació el PREAPP, un producto que refleja la síntesis de esta tesis doctoral y proporciona una herramienta valiosa para la industria de la construcción.

El plugin se concibe como una solución automatizada que integra un algoritmo innovador, capaz de generar y evaluar una amplia variedad de opciones de diseño, teniendo en cuenta las múltiples variables y subvariables que influyen en el proceso de construcción de elementos prefabricados en hormigón. A través de su interfaz intuitiva y fácil de usar, este plugin permitirá a los profesionales acceder a un conjunto completo de soluciones candidatas y seleccionar las más adecuadas en función de sus necesidades específicas y los requisitos del proyecto.

El objetivo principal de este capítulo es presentar en detalle el proceso de creación del plugin, desde la definición de las variables y subvariables relevantes para el diseño de elementos prefabricados en hormigón, hasta la implementación del algoritmo y la validación de su efectividad mediante estudios de caso. Asimismo, se discutirán los desafíos y consideraciones asociados con el desarrollo de esta herramienta, así como las ventajas y beneficios que ofrece a los profesionales del campo de la construcción.

El capítulo se estructura en siete secciones principales, correspondientes a los siete pasos clave en la creación del plugin. Cada sección aborda los aspectos relevantes del respectivo paso, desde la generación de las soluciones candidatas hasta la clasificación de las mejores opciones de diseño. Además, se analizan los criterios de evaluación utilizados y se presentan los resultados obtenidos en la aplicación del plugin en estudios de caso específicos.

Sección 1: definición de variables y subvariables

En el marco de la creación del plugin, la sección 1 tiene como objetivo establecer las variables y subvariables consideradas en el algoritmo de selección de decisiones de diseño para elementos prefabricados en hormigón. Las variables fueron elegidas mediante un proceso de evaluación de los aspectos relevantes en el diseño y construcción de elementos prefabricados en hormigón. A continuación, se describen los criterios utilizados para su selección:

1. Relevancia en el proceso de diseño: Se consideró la importancia de cada variable en el proceso de diseño de elementos prefabricados en hormigón. Aquellas variables que tienen un impacto significativo en el rendimiento, la calidad y la eficiencia del producto final fueron seleccionadas.
2. Influencia en los resultados: Se evaluó la influencia directa que cada variable tiene en los resultados finales de los elementos prefabricados. Aquellas variables que tienen un efecto considerable en aspectos como la resistencia, la durabilidad, la estética y la funcionalidad fueron consideradas.
3. Viabilidad de evaluación: Se tuvo en cuenta la viabilidad de evaluar y medir cada variable de manera objetiva. Se seleccionaron variables que pudieran ser cuantificadas y evaluadas de manera precisa, lo cual permite realizar comparaciones y análisis rigurosos.
4. Diversidad de opciones: Se buscó incluir variables que permitieran la consideración de diferentes opciones y combinaciones en el proceso de diseño. Esto asegura que el algoritmo pueda evaluar una amplia gama de posibilidades y recomendar soluciones óptimas.

Sección 2: generación de soluciones candidatas

Como continuación de la Sección 1, en esta sección, se explica en cómo estas variables se aplicaron en los estudios de caso mencionados, y cómo su combinación permite generar un abanico de soluciones candidatas.

Se consideran soluciones candidatas las diversas combinaciones posibles de las variables y subvariables definidas en el marco del proyecto de diseño de elementos prefabricados en hormigón. Representan opciones potenciales que cumplen con los criterios establecidos y se generan mediante la exploración de las diferentes configuraciones de las variables. Cada solución candidata es una instancia particular que combina valores específicos para cada variable y subvariable. Estas combinaciones representan diferentes enfoques de diseño que pueden abordar los requisitos técnicos, estéticos y económicos establecidos para el proyecto. Por ejemplo, una solución candidata puede implicar el uso de hormigón de alta resistencia, elementos prefabricados de gran tamaño con forma curva, unión mediante soldadura, refuerzo de acero de alta resistencia, acabado texturizado, geometría de pilar circular, secuencia de montaje vertical con grúa móvil y anclajes químicos.

Esta generación de soluciones candidatas es fundamental en el desarrollo del algoritmo, ya que permite explorar un amplio espacio de diseño y evaluar múltiples opciones antes de tomar decisiones finales. Sirven como base para el análisis y la evaluación posterior, donde se aplicarán criterios y métricas para seleccionar las soluciones óptimas que mejor se ajusten a los objetivos del proyecto. Este proceso constituye un paso crítico en el desarrollo del plugin, ya que nos permite explorar diversas combinaciones de variables y subvariables para obtener opciones de diseño que cumplan con los requisitos técnicos, estéticos y económicos de cada proyecto. Con base en los estudios de caso de los proyectos realizados por la empresa Astori, se aplican estrategias específicas para garantizar la eficiencia en la generación de estas soluciones.

Sección 3: Evaluación de Criterios

El uso de sistemas constructivos prefabricados en hormigón ha revolucionado la industria de la construcción, sin embargo, su selección adecuada es necesaria para garantizar la calidad, la durabilidad y la eficiencia de las estructuras construidas. En este contexto, la evaluación de criterios resulta fundamental para la elección del sistema constructivo más adecuado a los requisitos específicos de cada proyecto.

En esta sección, se evaluaron los criterios. Se presenta estos criterios, y se explica cómo se asignan los pesos a cada uno en función de su importancia relativa. Se discuten los métodos utilizados para cuantificar y medir cada criterio, y se presentan las fórmulas y escalas de evaluación empleadas. Se realizó una revisión de la literatura científica y técnica disponible en bases de datos especializadas. Se identificaron y analizaron los criterios más relevantes utilizados en la evaluación de sistemas constructivos prefabricados en hormigón. Se agruparon en categorías temáticas para facilitar su comprensión y análisis. Además, se tuvo en cuenta la opinión de expertos en el campo para validar los criterios y proporcionar una visión integral y actualizada.

La revisión bibliográfica se realizó para identificar aquellos que influyen en la calidad y desempeño de los sistemas constructivos prefabricados en hormigón, que se agruparon en nueve categorías: resistencia estructural, durabilidad, eficiencia constructiva, desempeño térmico y acústico, sostenibilidad, costo, flexibilidad y adaptabilidad, calidad y estética, y mantenimiento y vida útil.

Resistencia estructural: La resistencia del sistema constructivo es fundamental para garantizar la estabilidad y seguridad de la estructura. Se han considerado estudios que analizan la capacidad de carga, la resistencia a los esfuerzos mecánicos y la durabilidad de los elementos prefabricados (Borowczyk, Badowski, & Radziszewski, 2020). Los sistemas

constructivos prefabricados en hormigón se destacan por su alta resistencia estructural, lo cual fue evidente en los estudios de caso de Astori. Por ejemplo, en el Estadio Multipropósito Parque Roca, se utilizaron elementos prefabricados de hormigón para construir las graderías y las estructuras de soporte, garantizando la seguridad y la capacidad de carga requeridas para eventos masivos. De manera similar, en el Hotel Griffa, los paneles prefabricados de hormigón se emplearon en la construcción de las paredes exteriores, proporcionando resistencia y estabilidad a la estructura.

Durabilidad: La durabilidad se refiere a la capacidad del sistema constructivo para resistir las condiciones ambientales y mantener su integridad a lo largo del tiempo. Se han tomado en cuenta investigaciones sobre la resistencia a la corrosión, la degradación química y la durabilidad frente a factores climáticos (Maes, Creemers, De Schutter, & Taerwe, 2021). Los sistemas prefabricados en hormigón ofrecen una excelente durabilidad, resistiendo a condiciones ambientales adversas y al paso del tiempo. En el estudio de caso de Costa Urbana Shopping, se utilizaron elementos prefabricados de hormigón para construir la fachada del centro comercial, lo cual garantiza su resistencia a la intemperie y su capacidad para mantener su aspecto visual atractivo a lo largo de los años. Asimismo, en el Pabellón Verde, los paneles prefabricados de hormigón fueron empleados para crear una estructura duradera y resistente que puede soportar las cargas y condiciones climáticas cambiantes.

Eficiencia constructiva: Se ha considerado la eficiencia constructiva como criterio clave debido a su impacto en el tiempo y los recursos necesarios para la construcción. Estudios que abordan aspectos como la rapidez de montaje, la reducción de desperdicios y la optimización de procesos constructivos han sido consultados (Lu, Zhai, Xie, Liu, & Zhao, 2017; Bilec, Karatas, & Amrehn, 2020). Los sistemas constructivos prefabricados en hormigón ofrecen ventajas en términos de eficiencia constructiva, permitiendo un proceso de construcción más rápido y controlado. En el caso de Finca José Ignacio, se utilizó una

combinación de paneles prefabricados de hormigón y elementos estructurales prefabricados para acelerar la construcción de las viviendas de lujo. Esto permitió reducir los tiempos de construcción y optimizar los recursos, obteniendo resultados de alta calidad en un plazo más corto.

Desempeño térmico y acústico: La capacidad de los sistemas constructivos para proporcionar aislamiento térmico y acústico adecuados es fundamental para el confort y la eficiencia energética de los edificios. Investigaciones relacionadas con la conductividad térmica, la reducción del ruido y el ahorro energético han sido revisadas (Cai, Ye, & Zhang, 2018; Pacheco-Torgal, Tam, & Ding). En el estudio de caso del Pabellón Verde, los paneles prefabricados de hormigón fueron diseñados con aislamiento térmico incorporado, lo cual contribuye a la eficiencia energética del edificio y al confort interior. Además, en el Estadio Multipropósito Parque Roca, los elementos prefabricados de hormigón ayudaron a minimizar la transmisión de ruido y vibraciones, mejorando la experiencia de los espectadores.

Sostenibilidad: La sostenibilidad es un aspecto cada vez más relevante en la construcción, y se ha incluido como criterio para evaluar el impacto ambiental de los sistemas constructivos prefabricados en hormigón. Se han consultado estudios sobre la huella de carbono, la eficiencia en el uso de recursos y la incorporación de materiales reciclados (Nguyen, Watanabe, Nakagawa, & Sato, 2019; Jaber, Rosado, Kettleborough, & Paez, 2020). Los sistemas constructivos prefabricados en hormigón pueden ser una opción sostenible en términos de materiales y procesos de construcción. En los estudios de caso de Astori, se implementaron prácticas sostenibles, como el uso de hormigón reciclado y la optimización del consumo de recursos, reduciendo así el impacto ambiental de los proyectos. Por ejemplo, en el Estadio Multipropósito Parque Roca se utilizó hormigón

reciclado en la construcción de las gradas, mientras que en el Hotel Griffa se implementaron medidas de eficiencia energética y gestión de residuos.

Costo: El aspecto económico es crucial en la toma de decisiones constructivas, por lo que se ha considerado el análisis de costos como criterio de evaluación. Se han consultado investigaciones que abordan el análisis de costo-efectividad, los costos de producción y los beneficios económicos asociados a los sistemas prefabricados (Chen, Zhang, & Li, 2016; Duarte, Teixeira, & Cardoso, 2021). En los estudios de caso de Astori, se pudo observar que el uso de sistemas prefabricados en hormigón ofreció ventajas en términos de costos. Por ejemplo, en el Costa Urbana Shopping, el uso de elementos prefabricados de hormigón permitió reducir los tiempos de construcción, lo que resultó en ahorros significativos en mano de obra y costos generales del proyecto. De manera similar, en el Estadio Multipropósito Parque Roca, la prefabricación de elementos de hormigón contribuyó a una construcción más eficiente y a una mejor gestión de los recursos, lo que se tradujo en una optimización de los costos.

Flexibilidad y versatilidad: La flexibilidad y adaptabilidad de los sistemas constructivos prefabricados en hormigón se refieren a su capacidad para ser modificados, reubicados o reconfigurados según las necesidades cambiantes del proyecto o del entorno construido. Estos aspectos son especialmente relevantes en términos de reutilización de elementos prefabricados y la posibilidad de adaptación a diferentes diseños arquitectónicos y requerimientos funcionales (Barros, Fernandes, & Branco, 2016; Wang, Yu, Liu, Hu, & Xie, 2019). En el estudio de caso de Finca José Ignacio, se utilizaron paneles prefabricados de hormigón que se adaptaron a los diseños personalizados de las viviendas, permitiendo una mayor flexibilidad en la distribución de espacios y en la estética de los edificios. Además, en el Pabellón Verde, los paneles prefabricados de hormigón se diseñaron de

manera modular, lo que facilitó su instalación y permitió una mayor adaptabilidad a las necesidades específicas del proyecto.

Calidad estética: La calidad y estética de los sistemas constructivos prefabricados en hormigón son aspectos clave para garantizar la apariencia visual y la satisfacción del usuario. Se han considerado investigaciones que evalúan la calidad del acabado superficial, la variedad de diseños y la integración estética con el entorno arquitectónico (Fernández-Tabales, Suarez-Burgoa, Casanueva, & Ramos, 2017; Hinojosa, Martín, & Frías, 2020). Los sistemas constructivos prefabricados en hormigón pueden lograr resultados estéticos de alta calidad. En los estudios de caso de Astori, se pudo apreciar la utilización de elementos prefabricados de hormigón con acabados superficiales y texturas que contribuyeron a la estética general de los proyectos. Por ejemplo, en el Hotel Griffa, los paneles de hormigón prefabricados se diseñaron con acabados texturizados y colores específicos para lograr una apariencia moderna y sofisticada. Esta calidad estética fue también evidente en el Estadio Multipropósito Parque Roca, donde se utilizaron elementos prefabricados de hormigón con detalles arquitectónicos que realzaron la apariencia del edificio.

Mantenimiento y vida útil: El análisis del mantenimiento requerido y la vida útil de los sistemas constructivos es fundamental para evaluar su desempeño a largo plazo y los costos asociados. Se han consultado estudios que abordan la durabilidad de los materiales, los ciclos de mantenimiento y la vida útil esperada de los elementos prefabricados (Yan, Chen, & Lin, 2018; Geng, Ma, & Qian, 2021). Los sistemas prefabricados en hormigón suelen requerir un bajo mantenimiento y ofrecen una vida útil prolongada. En los estudios de caso de Astori, se pudo observar que los elementos prefabricados de hormigón utilizados en los proyectos presentaban una resistencia duradera y requerían poco mantenimiento a lo largo del tiempo. Por ejemplo, en el Hotel Griffa, los paneles de hormigón prefabricados

se mantuvieron en excelentes condiciones a lo largo de los años con un mantenimiento mínimo, lo que contribuyó a la rentabilidad y la durabilidad del edificio.

La selección de estas nueve categorías se basa en su relevancia en la evaluación integral de los sistemas constructivos prefabricados en hormigón y en la disponibilidad de estudios científicos y técnicos que respaldan su importancia. Al considerar estos criterios de los estudios de caso, se busca evaluar y comparar hasta qué punto se ajustan e iluminan el desempeño de los sistemas constructivos prefabricados en hormigón utilizados en nuestros casos de estudio: Estadio Multipropósito Parque Roca, Finca José Ignacio, Costa Urbana Shopping, Hotel Griffa y Pabellón Verde. Con este enfoque multidimensional, se pretendió obtener una visión completa de los aspectos que influyen en la selección de los sistemas constructivos prefabricados en hormigón, para aportar información valiosa en futuros proyectos.

Sección 4: implementación del algoritmo

En esta sección se detalla el cuarto paso clave en la creación del plugin: la implementación del algoritmo. El enfoque utilizado permite evaluar cada una de las soluciones candidatas en base a los criterios establecidos. Las técnicas algorítmicas empleadas, como algoritmos genéticos o métodos de búsqueda heurística, y se describe y se discute la eficiencia computacional y la escalabilidad del algoritmo implementado.

El algoritmo de optimización fue concebido para valorar y clasificar las soluciones candidatas conforme a los criterios previamente definidos. Su construcción se basó en técnicas algorítmicas avanzadas, tales como algoritmos genéticos, que simulan procesos de selección natural para optimizar soluciones, y métodos de búsqueda heurística, diseñados

para explorar el espacio de soluciones de manera eficiente y encontrar aproximaciones óptimas en problemas complejos.

Es fundamental subrayar la importancia de la eficiencia computacional en este contexto. Un algoritmo eficiente garantiza que, incluso cuando se manejan grandes volúmenes de datos o soluciones, el tiempo de respuesta y procesamiento sigue siendo adecuado. Además, se tuvo en cuenta la escalabilidad del algoritmo, es decir, su capacidad para manejar un crecimiento en la cantidad de datos o en la complejidad del problema sin que ello afecte de manera desproporcionada su rendimiento.

Más allá de la mera descripción técnica, planteamos que la elección de estas técnicas algorítmicas y su implementación adecuada influyen directamente en la calidad y precisión de las recomendaciones ofrecidas, consolidando su relevancia en el campo de la construcción.

Sección 5: selección de las mejores opciones de diseño

En esta sección se aborda el quinto paso en el desarrollo del plugin: la selección de las mejores opciones de diseño. No basta con tener una amplia gama de soluciones posibles si no se cuenta con un mecanismo para distinguir entre las más y menos adecuadas según criterios específicos.

Primero se establecieron una serie de métricas o criterios de evaluación que permitieran puntuar las diferentes soluciones candidatas. Estas métricas abordan aspectos como la sostenibilidad, el coste, la eficiencia energética o la funcionalidad del diseño. Ya definidas estas métricas, se implementó un algoritmo encargado de analizar y puntuar cada solución candidata en función de los criterios establecidos. Este algoritmo no solo clasifica, sino

que identifica soluciones que, aunque no sean óptimas en un sentido estricto, se aproximen lo máximo posible a la óptima, ofreciendo así un abanico de opciones viables.

Se consideró la variable “Tipo de Hormigón” como una de las principales, ya que puede tener un impacto significativo en su resistencia, durabilidad y comportamiento estructural. Se establecieron dos subvariables: “Hormigón Convencional” y “Hormigón de Alta Resistencia”, que representan diferentes niveles de resistencia y propiedades específicas del material.

La siguiente variable, “Tamaño y Forma de los Elementos Prefabricados”, se introdujo para capturar las diferentes dimensiones y formas que pueden adoptar estos elementos. Se definieron cuatro subvariables: “Pequeños Elementos con Forma Rectangular”, “Pequeños Elementos con Forma Curva”, “Grandes Elementos con Forma Rectangular” y “Grandes Elementos con Forma Curva”. Estas subvariables permiten considerar la diversidad de formas y tamaños presentes en los elementos prefabricados en hormigón.

La elección de la variable “Tipo de Junta” se basa en la importancia de los sistemas de unión utilizados en la conexión de los elementos prefabricados. Las cuatro subvariables establecidas son: “Encaje”, “Soldadura”, “Tornillos” y “Adhesivo”. Cada una de estas subvariables representa un método de unión específico con características y propiedades únicas.

La variable “Tipo de Refuerzo” se incorporó para analizar los diferentes tipos de refuerzo utilizados en los elementos prefabricados. Las dos subvariables definidas son “Acero Convencional” y “Acero de Alta Resistencia”. El tipo de refuerzo seleccionado puede influir en la capacidad de carga, la resistencia al impacto y la durabilidad del elemento prefabricado.

La siguiente variable, “Técnicas de Acabado Superficial”, tiene como objetivo considerar las diversas técnicas utilizadas para proporcionar el acabado final a los elementos prefabricados en hormigón. Se establecieron cuatro subvariables: “Acabado Liso”, “Acabado Texturizado”, “Acabado Colorido” y “Acabado con Revestimiento”. Estas subvariables reflejan las diferentes opciones disponibles para mejorar el aspecto estético y la protección superficial de los elementos prefabricados.

La variable “Geometría y Disposición de los Elementos Prefabricados” se introdujo para tener en cuenta las distintas configuraciones y disposiciones que pueden presentar estos elementos en una estructura. Las cuatro subvariables definidas son: “Pared Recta”, “Pared Curva”, “Pilar Rectangular” y “Pilar Circular”. Estas subvariables permiten considerar las variaciones en la geometría y disposición de los elementos prefabricados.

La variable “Secuencia de Montaje y Procedimientos de Elevación” se consideró para abordar las diferentes secuencias y métodos utilizados en el montaje y la elevación de los elementos prefabricados. Esta variable es fundamental para comprender y optimizar los procesos de construcción, ya que la secuencia de montaje y los procedimientos de elevación pueden afectar la eficiencia, la seguridad y la integridad de los elementos prefabricados. Se definieron cuatro subvariables: “Montaje Horizontal”, “Montaje Vertical con Grúa”, “Montaje Vertical con Grúa Móvil” y “Montaje en Voladizo”, representando diferentes enfoques utilizados en la instalación de los elementos prefabricados.

La variable “Sistemas de Anclaje y Fijación de los Elementos Prefabricados” se incorporó para analizar los métodos utilizados en la unión de los elementos prefabricados entre sí y a la cimentación. Las cuatro subvariables definidas son: “Anclajes Metálicos”, “Anclajes Químicos”, “Conectores de Acero” y “Conectores de Fibra de Carbono”. Estas subvariables reflejan las opciones de sistemas de anclaje y fijación disponibles en la industria de elementos prefabricados en hormigón.

Por último, la variable “Métodos de Transporte y Logística en la Entrega de los Elementos Prefabricados al Sitio de Construcción” se consideró para abordar los diferentes métodos de transporte utilizados para entregar los elementos prefabricados al lugar de construcción. Las cuatro subvariables establecidas son: “Transporte por Camión”, “Transporte por Barco”, “Transporte por Tren” y “Transporte por Avión”. Estas subvariables permiten tener en cuenta las distintas opciones logísticas utilizadas en la industria de elementos prefabricados.

La elección y definición de estas variables y subvariables, basadas en los estudios de caso de la empresa Astori, proporciona un enfoque completo y estructurado para el análisis de los elementos prefabricados en hormigón. Abarcan aspectos fundamentales que influyen en el rendimiento, la calidad, la eficiencia y la viabilidad de los elementos prefabricados. Su consideración en el desarrollo del algoritmo del plugin permite obtener resultados significativos y contribuir al avance del conocimiento de la construcción con elementos prefabricados en hormigón.

Sección 6: validación

En esta sección se explora el sexto paso: la validación mediante estudios de caso. Los casos estudiados en esta investigación representaron escenarios reales para la aplicación del plugin. Se mostraron los procedimientos de validación utilizados, los resultados obtenidos y las conclusiones extraídas de estos estudios. El análisis de los resultados arrojados por el algoritmo permitió comprender la eficacia del proceso de selección. Se evaluó en qué medida era capaz de identificar soluciones verdaderamente óptimas, y se analizó el tiempo requerido para procesar la información y la relación entre el número de soluciones analizadas y las efectivamente clasificadas como óptimas.

Modo de operación del PREAPP

El plugin PREAPP opera utilizando un algoritmo que toma en cuenta las múltiples variables y subvariables definidas en estudios de caso de la empresa Astori. No solo proporciona una visualización clara de la configuración de construcción deseada, sino que ofrece soluciones viables basadas en datos reales y confiables. A continuación, se detalla cómo funciona el plugin:

Ingreso de Datos

El usuario comienza introduciendo información específica del proyecto, como la ciudad donde se ubica, el tipo de construcción (ya sea residencial, comercial, industrial, institucional, hotelero, cultural o deportivo) y la orientación de la fachada de la edificación en la que desea hacer el estudio (Ilustración 61).

Procesamiento Climático

Una vez ingresada la ciudad, el plugin PREAPP accede a una base de datos para obtener parámetros climáticos relevantes: temperatura, humedad, velocidad del viento, dirección del viento y azimut solar. Esta información es esencial para considerar las condiciones ambientales que pueden afectar el desempeño y durabilidad de los elementos prefabricados. Se incluyó en los anexos todos los códigos en Python utilizados para el procesamiento climático. Es importante destacar que, a pesar de compartir estos códigos, la utilidad y la aplicación específica de los mismos se encuentran protegidas bajo el proceso de patente, limitando su uso y reproducción sin la debida autorización.

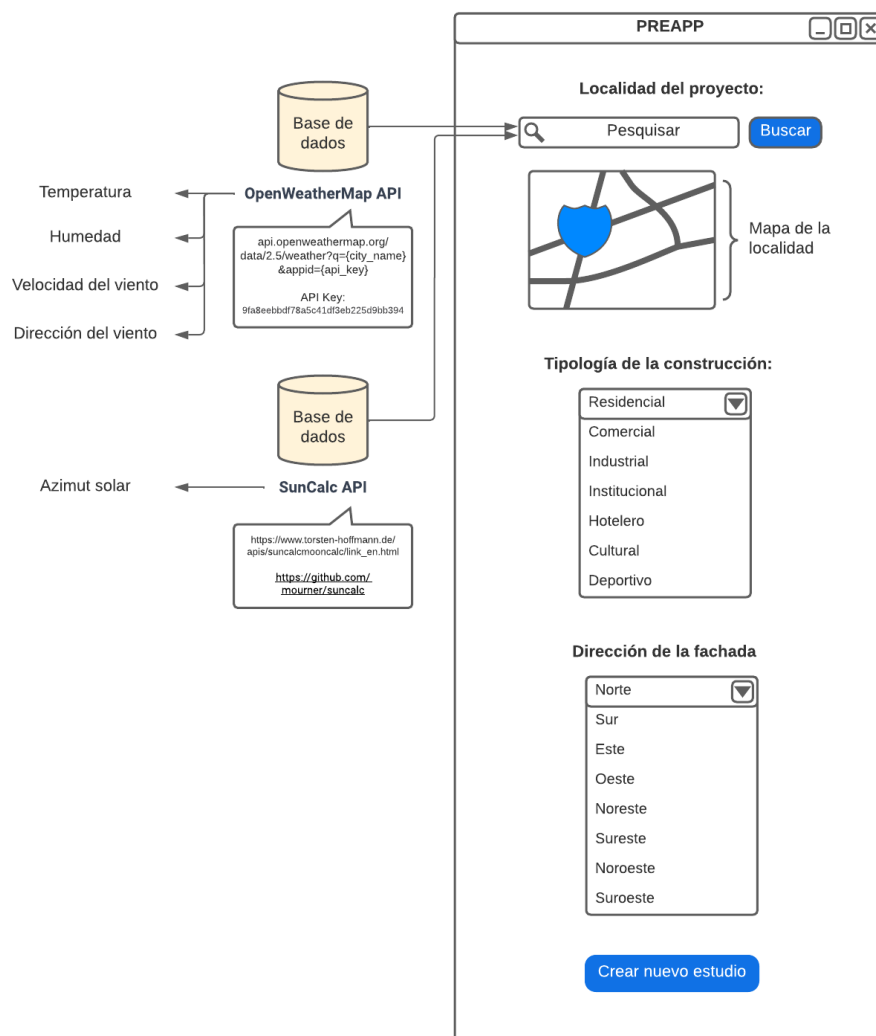


Ilustración 61 – Interfaz del plugin PREAPP presentando el origen de los datos ingresados y de la base de datos ya integrada en el plugin. Fuente: PREAPP, elaboración propia.

Selección de Elementos Prefabricados

Con base en las variables y subvariables identificadas (como tipo de hormigón, forma de los elementos, técnicas de acabado, entre otras), el plugin sugiere las opciones más adecuadas y viables para el proyecto, garantizando así la eficiencia y calidad de la construcción.

Simulación y Análisis

El plugin realiza simulaciones, considerando las combinaciones posibles de las variables y subvariables con las condiciones climáticas específicas (Ilustración 62). Así, permite identificar potenciales problemas, como resonancias acústicas o problemas de durabilidad, y sugiere soluciones adecuadas.



Ilustración 62 – Interfaz del plugin PREAPP presentando las recomendaciones de diseño, estructuradas según los criterios de evaluación en una escala de 0 a 5. También presenta la opción de “descargar” para descargar el informe del análisis. Fuente: PREAPP, elaboración propia.

Optimización Logística

Partiendo de la selección de elementos prefabricados, el plugin actúa como un asesor estratégico, proponiendo las opciones logísticas para el transporte de los componentes (Ilustración 63). No se limita a identificar medios de transporte; realiza un análisis considerando las dimensiones y el peso de los elementos, las restricciones accesibilidad, y la proximidad a infraestructuras y plantas industriales. De esta forma, se garantiza una entrega eficiente y económicamente viable y minimizando el riesgo de demoras y daños.



Ilustración 63 – Interfaz del plugin PREAPP presentando las recomendaciones de montaje, estructuradas según los criterios de evaluación en una escala de 0 a 5. También presenta la opción de “download” para descargar el informe del análisis. Fuente: PREAPP, elaboración propia.

Los sistemas constructivos prefabricados en hormigón se adaptan a una variedad de aplicaciones, pero es fundamental considerar las especificidades de cada tipo de edificación para maximizar su eficiencia y funcionalidad. Para edificaciones institucionales, como escuelas o edificios gubernamentales, es esencial que los prefabricados en hormigón cumplan con ciertas normas de seguridad y accesibilidad. Estas edificaciones suelen tener una gran afluencia de personas, por lo que su diseño debe permitir una circulación fluida y sin obstrucciones.

En el caso de edificaciones residenciales, los prefabricados en hormigón deben ofrecer flexibilidad en cuanto a diseño y disposición de espacios. Además, es fundamental que estos sistemas proporcionen aislamiento acústico y térmico adecuado para garantizar la comodidad de sus habitantes. Las edificaciones comerciales, como tiendas o centros comerciales, requieren de una resistencia estructural acorde con la cantidad y variedad de cargas que deben soportar, además de espacios amplios y de fácil adaptación según las necesidades del negocio.

Las edificaciones industriales, tales como fábricas o almacenes, tienen requisitos específicos en términos de resistencia estructural y adaptabilidad espacial. Los sistemas prefabricados en hormigón son ideales para estos contextos debido a su robustez y capacidad para crear grandes espacios diáfanos sin obstrucciones, facilitando la ubicación de maquinaria pesada y la circulación de mercancías. En el ámbito hotelero, la estética y la funcionalidad deben ir de la mano. Los prefabricados en hormigón ofrecen soluciones versátiles que pueden adaptarse a diferentes estilos arquitectónicos, sin comprometer la comodidad o la experiencia del huésped. Además, la rapidez de construcción que ofrecen estos sistemas puede ser un factor determinante para los inversores que buscan retornos rápidos.

Por último, en las edificaciones culturales, como museos, teatros o bibliotecas, es primordial que los prefabricados en hormigón permitan la creación de espacios que realcen la experiencia cultural. Esto implica tener en cuenta la acústica, la iluminación y la versatilidad de los espacios, para que puedan adaptarse a diferentes exposiciones o eventos. Por lo tanto, es evidente que, aunque los sistemas constructivos prefabricados en hormigón tienen un amplio rango de aplicabilidad, es esencial considerar las particularidades de cada tipo de edificación para garantizar un uso óptimo y eficiente del material. A continuación, se detallan estas especificaciones en las recomendaciones de uso en la Ilustración 64.

A continuación, también se presenta un infográfico (Ilustración 65) que proporciona una visión completa y estructurada de las diferentes opciones y características consideradas en el desarrollo del algoritmo del plugin. Cada fila representa una solución candidata, donde se especifica la combinación de valores para cada variable y subvariable.

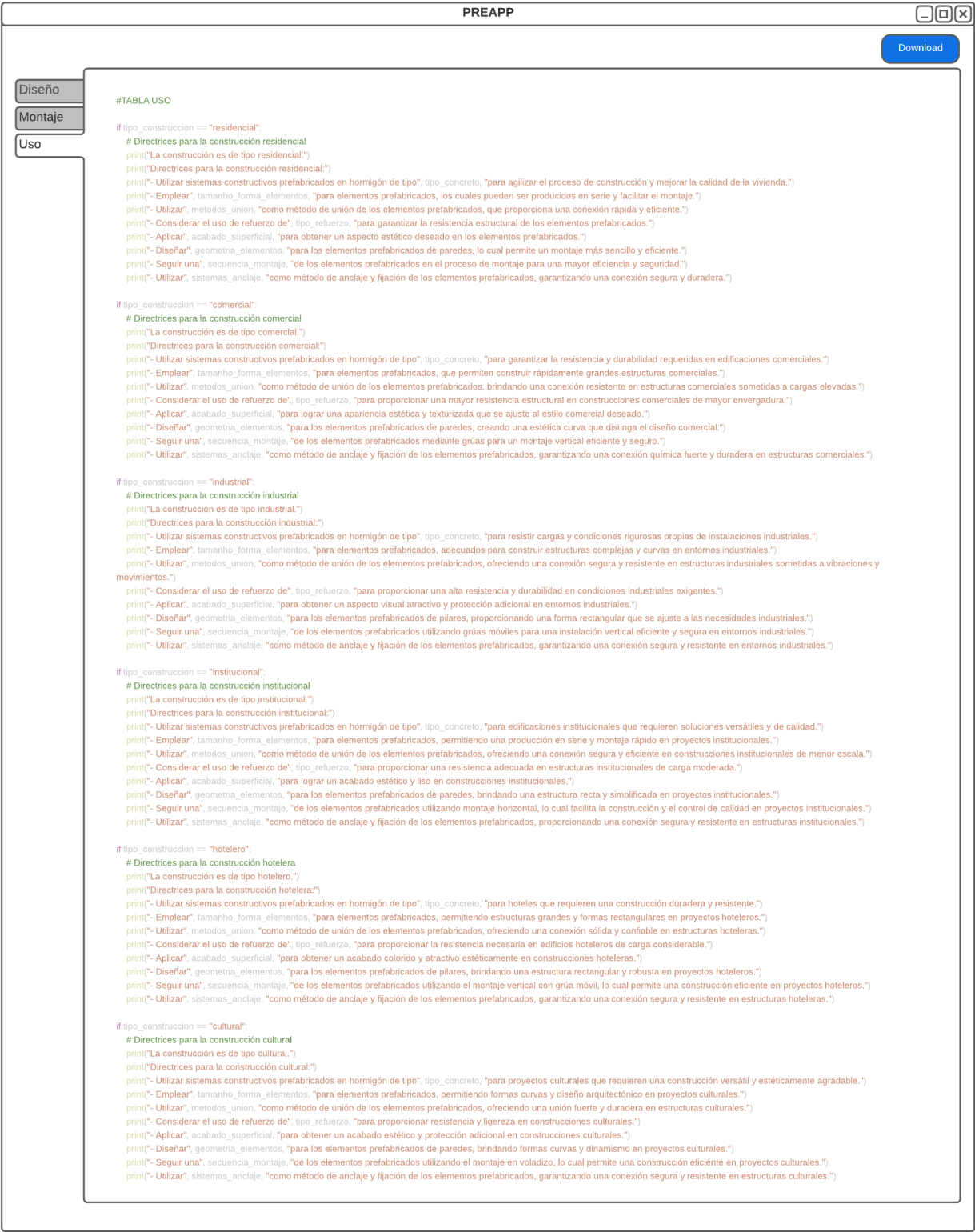


Ilustración 64 – Interfaz del plugin PREAPP presentando las recomendaciones de uso, estructuradas según los criterios de evaluación en una escala de 0 a 5. También presenta la opción de “download” para descargar el informe del análisis. Fuente: PREAPP, elaboración propia.

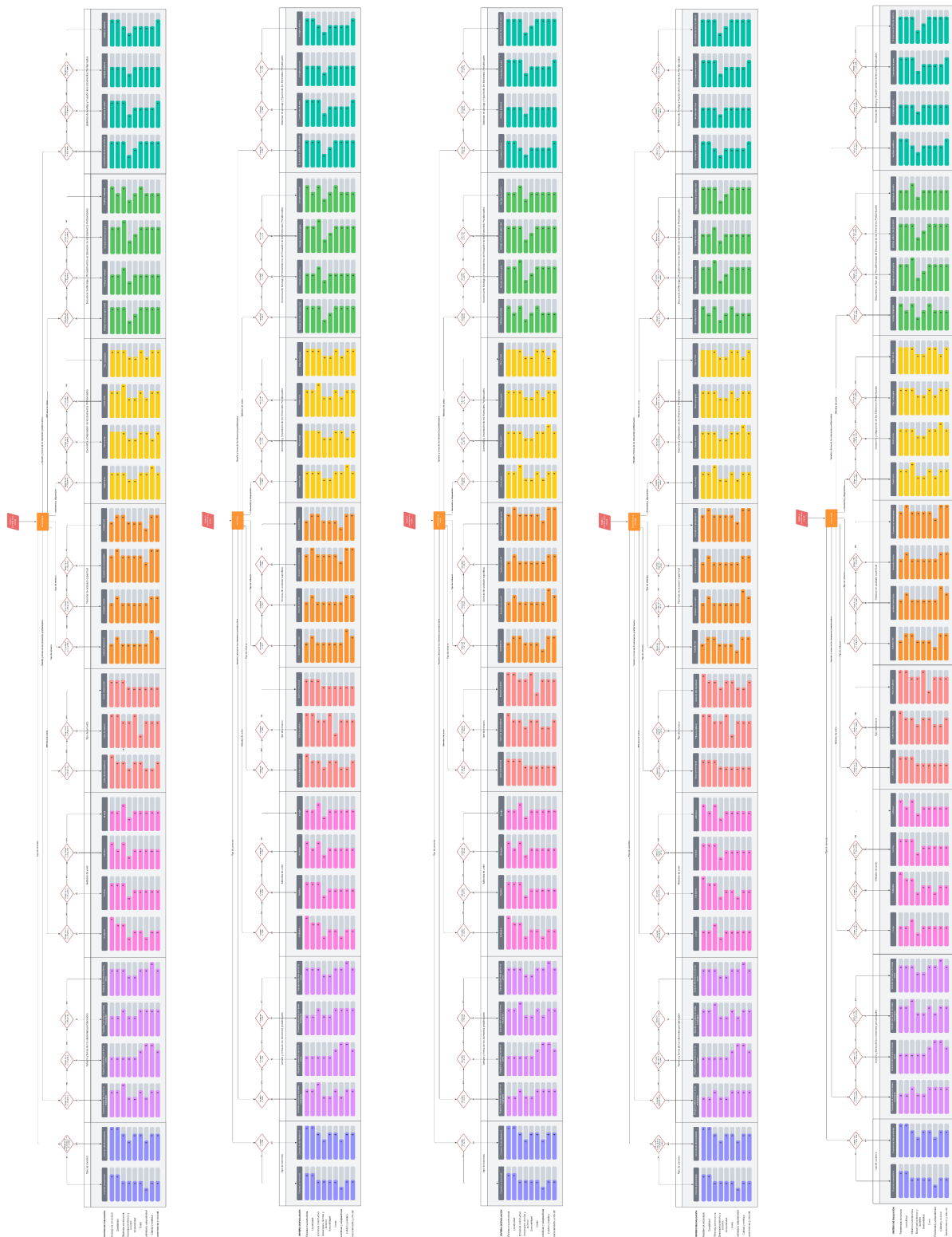


Ilustración 65 – Tabla con las reglas del PREAPP para las recomendaciones de diseño, montaje y uso. Fuente: Elaboración propia.

Informe y Recomendaciones

El PREAPP, al culminar su análisis, produce un informe que refleja el escrutinio efectuado sobre el proyecto. Se presenta como una amalgama de datos que, mediante su estructuración meticulosa, guía al estudiante o profesional en cada paso del proceso constructivo. A partir de la selección óptima de opciones basadas en criterios técnicos y funcionales, el reporte desglosa recomendaciones pertinentes que van desde técnicas de acabado, pasando por alternativas de refuerzo, hasta llegar a métodos de montaje específicos. Estas sugerencias son el fruto de un análisis respaldado por datos y algoritmos, ajustado a las particularidades y requisitos de cada proyecto.

La creación de PREAPP marca un hito en la intersección de la tecnología y la arquitectura. Si bien la herramienta facilita el proceso de toma de decisiones y optimiza el diseño y la implementación de sistemas prefabricados en hormigón, también resalta una tendencia creciente hacia la digitalización y la automatización en el campo de la construcción. Es imprescindible reconocer que, aunque PREAPP brinda recomendaciones basadas en análisis detallados, la interpretación y adaptación final de estas sugerencias quedan en manos del profesional. La herramienta, con todo su potencial, no debe suplantar el juicio crítico y la experiencia del arquitecto o ingeniero, sino servir como un complemento que enriquece y respalda el proceso de diseño y construcción.

Tras adentrarnos en la creación y las recomendaciones derivadas de PREAPP, es imperativo abordar otro aspecto estratégico del proceso: el patentamiento. El siguiente capítulo se refiere a la protección intelectual del plugin, subrayando su importancia en términos legales y como un paso fundamental en la consolidación de la herramienta en el mercado y en la comunidad profesional.

Patentamiento

Este capítulo se enfoca en el inicio del proceso de patentamiento del plugin PREAPP con el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Discutimos la importancia de este paso en el contexto más amplio de la investigación y desarrollo tecnológico, y cómo esta acción sitúa al plugin PREAPP en el camino hacia la protección intelectual completa.

Iniciar el proceso de patentamiento del plugin PREAPP a través del CONICET fue un movimiento estratégico que tiene implicancias tanto en el ámbito de la investigación como en el del desarrollo tecnológico. A nivel de investigación, puede considerarse como la culminación del ciclo de investigación y desarrollo (I+D), al pasar de la fase conceptual a una forma más tangible y protegida del conocimiento. Es un reconocimiento de que la investigación realizada tiene aplicaciones prácticas y un valor comercial potencial, lo cual podría fomentar más investigación en áreas relacionadas.

Desde la perspectiva del desarrollo tecnológico, conseguir una patente a través de una organización tan reconocida como el CONICET actúa como un sello de validación. Esto puede facilitar colaboraciones con la industria y atraer financiación para el desarrollo adicional del plugin o para su introducción en el mercado.

CONICET



FORMULARIO DE DIVULGACION DE INVENCION – FDI

DIRECCION DE VINCULACIÓN TECNOLOGIA - CONICET

La siguiente información es necesaria para que la Dirección de Vinculación Tecnológica (DVT) realice una evaluación sobre la factibilidad de protección intelectual y una evaluación económica de los resultados de investigación informados, como así también un análisis adecuado de su posible comercialización. Por favor sea detallado y específico en las respuestas; adjunte fotos, dibujos, u otro material relevante para la evaluación.

ESTA INFORMACION ES Estrictamente CONFIDENCIAL

INDIQUE CON UNA CRUZ EN EL CASO DE ESTAR CONSIDERANDO LA DIVULGACION DE LA INVENCION EN
LOS PROXIMOS DOS MESES ☒

Nombres de el/los investigador(es) que contribuyeron en la invención: Lucianne Casasanta García; Bernard Kamsu Fogueu.

Título: Plugin de Recomendaciones para la Eficiencia en Arquitectura Prefabricada (PREAPP)

Resumen del Invento: PREAPP es una herramienta digital innovadora destinada a revolucionar el campo de la arquitectura prefabricada. Este plugin, integrado con sistemas de diseño asistido por computadora, proporciona recomendaciones proyectuales críticas, abarcando aspectos formales, funcionales, técnicos y tecnológicos, esenciales para la arquitectura prefabricada eficiente. La herramienta utiliza el método MEAP para analizar y sugerir optimizaciones de diseño, promoviendo la eficiencia en la toma de decisiones y planificación de proyectos. PREAPP está diseñado para impulsar la adopción de estructuras prefabricadas en Argentina y Latinoamérica, destacando su capacidad para innovar y mejorar la eficiencia en la construcción civil.

Email/Teléfono del investigador de contacto: lcasasanta@conicet.gov.ar / +54 9 341 227 4877

Departamento: Centro Universitario Rosario de Investigaciones Urbanas y Regionales (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas - Universidad Nacional de Rosario)

Área/mercado potencial: Arquitectura civil y prefabricada, empresas de construcción, estudios de arquitectura, educación en ingeniería civil y arquitectura.

¿El/los investigadores tiene/s interés en participar en el desarrollo comercial de la invención ?

SI ☒

NO ☐

Comentarios: Este proyecto representa una oportunidad significativa para modernizar la construcción prefabricada, introduciendo eficiencias en diversas etapas del proceso de diseño y construcción. Además, al alentar la adopción de tecnologías sustentables y prácticas eficientes, PREAPP tiene el potencial de contribuir positivamente al desarrollo urbanístico y social en la región.

Ilustración 66 – Formulario de patentamiento del plugin PREAPP presentado al CONICET.
Fuente: CONICET.

Alcances y recomendaciones futuras

La contribución de esta tesis al campo de la arquitectura y la construcción representa un avance significativo en varios niveles. A nivel conceptual, la tesis introduce un enfoque integrado para la optimización de los sistemas constructivos prefabricados de hormigón. Esto se logra a través de la aplicación de la metodología DSR, lo que a su vez llevó a la formulación del método MEAP. Este método innovador se destaca tanto por su solidez teórica como por su practicidad. En el nivel práctico, el MEAP se traduce en una herramienta específica, el plugin llamado PREAPP, diseñado para ser utilizado por profesionales en el campo de la arquitectura y la construcción.

El MEAP actúa como un marco conceptual sólido y multifacético, enfocado en la evaluación integral de proyectos que emplean hormigón prefabricado. Cubre varios criterios de evaluación, desde factores económicos y eficiencia en el uso de materiales hasta impactos ambientales y estéticos. Este enfoque integral es lo que distingue al MEAP de otros métodos de evaluación existentes, ofreciendo una visión más completa y balanceada de los proyectos de construcción.

Este marco conceptual del MEAP se materializa a través del plugin PREAPP. El plugin es, en esencia, una herramienta software que permite a los arquitectos y constructores aplicar de forma efectiva los principios y evaluaciones del MEAP. PREAPP es compatible con múltiples plataformas de modelado y diseño arquitectónico y se integra de manera fluida en los flujos de trabajo existentes. Al hacer esto, el PREAPP elimina muchas de las barreras tradicionales para la implementación de métodos de evaluación avanzados, facilitando su adopción en la industria.

Este marco y herramienta no serían tan impactantes si no fuera por su validación empírica. La eficacia del MEAP y el PREAPP se evaluó a través de cinco estudios de caso en

proyectos estratégicos realizados por la empresa Astori, una de las líderes en el campo de la construcción prefabricada de hormigón en Argentina. Estos proyectos fueron cuidadosamente seleccionados para representar una amplia gama de desafíos y oportunidades en el campo, desde proyectos residenciales hasta infraestructuras públicas. Cada uno de estos casos proporcionó datos valiosos que se utilizaron no solo para validar el MEAP y el PREAPP sino también para refinar y mejorar estos instrumentos, haciendo que sean aún más efectivos y robustos.

Además de estas contribuciones metodológicas y prácticas, la tesis también destaca la importancia de integrar tecnologías modernas de gestión de datos, como el BIM y el modelado de conocimiento, en el proceso de construcción. La combinación de BIM con las herramientas de gestión de la ingeniería de producción demostró ser particularmente poderosa, facilitando una coordinación más efectiva entre las diversas partes interesadas en un proyecto y optimizando la toma de decisiones a lo largo de todas las fases del proyecto.

Un aspecto clave de esta tesis es su aplicabilidad más allá de las fronteras de Argentina. Dada la naturaleza modular y escalable del MEAP y del PREAPP, estas herramientas tienen un potencial significativo para ser adaptadas y aplicadas en diferentes contextos culturales y geográficos, extendiendo su impacto a una escala verdaderamente global.

En términos de investigaciones futuras, esta tesis deja abiertas varias vías interesantes. Una de ellas es cómo las tecnologías emergentes, en particular en el campo de la gestión sostenible de la energía, pueden incorporarse en el marco del MEAP y el PREAPP para fomentar la construcción de entornos urbanos más sostenibles.

En resumen, esta tesis proporciona un enfoque integrado para la evaluación y optimización de proyectos de construcción prefabricada de hormigón. El MEAP y el PREAPP,

validados empíricamente a través de casos de estudio en una de las empresas líderes en el sector, tienen el potencial de transformar de forma significativa la industria de la construcción no solo en Argentina, sino también en otros contextos a nivel global. La integración de tecnologías avanzadas de gestión de datos y la posibilidad de adaptación y escalabilidad del método y la herramienta, hacen de esta tesis una contribución significativa al campo, con un amplio espectro de aplicaciones futuras.

Listado de ilustraciones

Ilustración 1 – Imágenes de la estructura de las “Dom-Ino Houses”, proyectadas por Le Corbusier. Secciones, plano y perspectiva de las “Dom-Ino Houses”. Recuperado de https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/5032/Article09.pdf?sequence=6	39
Ilustración 2 – Imágenes del “Théâtre des Champs-Élysées”, proyectado por Auguste Perret. Fotografías del interior de la edificación [Conjunto de fotografías]. Recuperado de https://parishistoirevivante.com/le-theatre-des-champs-elysees-architecture	40
Ilustración 3 – Representación esquemática del Eje del Río de la Plata. Fuente: Elaboración propia.	43
Ilustración 4 – Fotografías del inicio de las operaciones de la empresa Astori en Argentina. Fuente: Astori Estructuras S.A. (n.d.). Fotografías [Conjunto de fotografías]. Recuperado de https://www.astoriestructuras.com.ar/novedad/50-anos-de-astori	44
Ilustración 5 – Obras que utilizaron el hormigón con fibra de vidrio (GRC). Fuente: Astori Estructuras S.A. (n.d.). Fotografías [Conjunto de fotografías]. Recuperado de https://www.astoriestructuras.com.ar/picast	46
Ilustración 6 – Obras que utilizaron el hormigón con fibra de vidrio (GRC). Fuente: Astori Estructuras S.A. (n.d.). Fotografías [Conjunto de fotografías]. Recuperado de https://www.astoriestructuras.com.ar/novedad/50-anos-de-astori	47
Ilustración 7 – Edificio de oficinas ejecutado por Brüninghoff GmbH & Co. en 2015 utilizando el sistema Beton-Bausystem. Fotografías [Conjunto de fotografías]. Recuperado de https://www.detail.de/de_de/holz-beton-bausystem-fuer-buerogebaeude-13258	49
Ilustración 8 – Museo de las Civilizaciones de Europa y el Mediterráneo (MuCEM) en Marsella, Francia. Fotografías [Conjunto de fotografías]. Recuperado de https://www.marseille.hu/le-mucem	50
Ilustración 9 – Bosco Verticale en Milán, Italia. Fotografías [Conjunto de fotografías]. Recuperado de https://www.infobuildenergia.it/approfondimenti/stefano-boeri-larchitetto-della-biodiversita-urbana	51
Ilustración 10 – Edificaciones con cerramientos lisos de Astori. Fuente: Astori Estructuras S.A. (n.d.). Fotografías [Conjunto de fotografías de las obras realizadas con paneles de cerramiento liso]. Recuperado de https://www.astoriestructuras.com.ar/sistemas/cerramientos-lisos	55
Ilustración 11 – Detalle de los paneles de cerramiento. Fuente: Astori Estructuras S.A. (n.d.). Cortes de los paneles de cerramiento liso [Conjunto de cortes de los paneles de cerramiento liso]. Recuperado de https://www.astoriestructuras.com.ar/sistemas/cerramientos-lisos	56
Ilustración 12 – Edificaciones con cerramiento nervurado de Astori. Fuente: Astori Estructuras S.A. (n.d.). Fotografías [Conjunto de fotografías de obras realizadas con paneles de cerramiento nervurado]. Recuperado de https://www.astoriestructuras.com.ar/sistemas/cerramientos-nervurados	57

- Ilustración 13** – Detalle de los paneles de cerramiento nervurado. Fuente: Astori Estructuras S.A. (n.d.). Cortes y vistas de los paneles de cerramiento nervurado [Conjunto de cortes y vistas]. Recuperado de <https://www.astoriestructuras.com.ar/sistemas/cerramientos-nervurados>.....58
- Ilustración 14** – Edificaciones con entrepisos de Astori. Fuente: Astori Estructuras S.A. (n.d.). Fotografías [Conjunto de fotografías de las obras realizadas con entrepisos de Astori]. Recuperado de <https://www.astoriestructuras.com.ar/sistemas/entrepisos>59
- Ilustración 15** – Detalle de los entrepisos. Fuente: Astori Estructuras S.A. (n.d.). Cortes y vistas de los entrepisos [Conjunto de cortes y vistas de los entrepisos]. Recuperado de <https://www.astoriestructuras.com.ar/sistemas/entrepisos>.....60
- Ilustración 16** – Edificaciones con el sistema de Estadios y Tribunas de Astori. Fuente: Astori Estructuras S.A. (n.d.). Fotografías [Conjunto de fotografías de las obras realizadas con el sistema]. Recuperado de <https://www.astoriestructuras.com.ar/sistemas/estadios>.....62
- Ilustración 17** – Detalle del sistema de Estadios y Tribunas. Fuente: Astori Estructuras S.A. (n.d.). Cortes y vistas del sistema de Estadios y Tribunas [Conjunto de cortes y vistas del sistema]. Recuperado de <https://www.astoriestructuras.com.ar/sistemas/estadios>.....63
- Ilustración 18** – Sistema constructivo de viviendas. Fuente: Astori Estructuras S.A. (n.d.). Fotografías [Conjunto de fotografías de las obras realizadas con el sistema constructivo de viviendas]. Recuperado de <https://www.astoriestructuras.com.ar/sistemas/sistema-constructivo-de-vivienda>64
- Ilustración 19** – Sistema Mixto. Fuente: Astori Estructuras S.A. (n.d.). Fotografías [Conjunto de fotografías de edificaciones con el sistema mixto]. Recuperado de <https://www.astoriestructuras.com.ar/sistemas/sistema-mixto>.....66
- Ilustración 20** – Capas del sistema mixto. Fuente: Astori Estructuras S.A. (n.d.). Fotografía [Fotografía de construcción con el sistema mixto]. Recuperado de <https://www.astoriestructuras.com.ar/sistemas/sistema-mixto>.....67
- Ilustración 21** – Detalle del sistema mixto. Fuente: Astori Estructuras S.A. (n.d.). Cortes y vistas del sistema mixto [Conjunto de cortes y vistas del sistema]. Recuperado de <https://www.astoriestructuras.com.ar/sistemas/sistema-mixto>.....68
- Ilustración 22** – Sistema Pi. Fuente: Astori Estructuras S.A. (n.d.). Fotografías [Conjunto de fotografías de edificaciones con el sistema Pi]. Recuperado de <https://www.astoriestructuras.com.ar/sistemas/sistema-pi>.....68
- Ilustración 23** – Detalle del sistema Pi. Fuente: Astori Estructuras S.A. (n.d.). Cortes y vistas del sistema Pi [Conjunto de cortes y vistas del sistema]. Recuperado de <https://www.astoriestructuras.com.ar/sistemas/sistema-pi>.....69
- Ilustración 24** – Detalle de las vigas pretensadas del sistema Pi. Fuente: Astori Estructuras S.A. (n.d.). Vistas de las vigas del sistema Pi [Conjunto de vistas de las vigas del sistema]. Recuperado de <https://www.astoriestructuras.com.ar/sistemas/sistema-pi>.....70

Ilustración 25 – Sistema Ypsilon. Fuente: Astori Estructuras S.A. (n.d.). Fotografías [Conjunto de fotografías de edificaciones con el sistema Ypsilon]. Recuperado de https://www.astoriestructuras.com.ar/sistemas/sistema-ypsilon	70
Ilustración 26 – Detalle del sistema Pi. Fuente: Astori Estructuras S.A. (n.d.). Cortes de los elementos del sistema Pi [Conjunto de cortes de los elementos del sistema]. Recuperado de https://www.astoriestructuras.com.ar/sistemas/sistema-ypsilon	71
Ilustración 27 – Detalle del sistema Pi. Fuente: Astori Estructuras S.A. (n.d.). Cortes y vistas de los elementos del sistema Pi [Conjunto de cortes y vistas de los elementos del sistema]. Recuperado de https://www.astoriestructuras.com.ar/sistemas/sistema-ypsilon	72
Ilustración 28 – Ejemplo de edificación presentando los datos de la metodología BIM. [Modelo elaborado en el software Revit por Hunter Douglas Architectural]. Recuperado de https://architectural.hunterdouglas.com.co/articulo/bim-la-nueva-tecnologia-en-construccion	83
Ilustración 29 – Como extraer listas de elementos, componentes y zonas del modelo en ArchiCad. [Entorno de trabajo del software ArchiCad]. Fuente: ArchiCad.	88
Ilustración 30 – Análisis de conflicto entre la estructura y los demás sistemas del proyecto. [Entorno de trabajo del software Revit]. Fuente: Revit.	109
Ilustración 31 – Análisis de la incidencia solar en los elementos del proyecto, con su respectiva correlación con los datos del modelo BIM. [Entorno de trabajo del software Ecotect]. Fuente: Ecotect.	110
Ilustración 32 – Consolidación de los datos de los elementos del sistema Astori analizados según resistencia a compresión, durabilidad y homogeneidad. [Entorno de trabajo del software Power BI]. Fuente: Power BI.	112
Ilustración 33 – Proceso de estructuración del MEAP – Selección, Preproceso, Transformación, Minería de datos, Interpretación y evaluación. Fuente: Elaboración propia.	118
Ilustración 34 – Proceso de minería de datos del software SPMF. Fuente: SPMF Java Open Source Data Minig Library (n.d.). Fuente: SPMF.....	131
Ilustración 35 – Mapa de los algoritmos realizados por el software SPMF. Fuente: SPMF Java Open Source Data Minig Library (n.d.). Recuperado de https://data-mining.philippe-fournier-viger.com/new-version-spmf-java-open-source-data-mining-library-0-95/	132
Ilustración 36 – Primera etapa del MEAP: selección de datos. Fuente: Elaboración propia.....	135
Ilustración 37 – Finca José Ignacio. Fuente: Adaptado de Semanario Búsqueda, N°1848, 06 diciembre 2015.....	137
Ilustración 38 – Planta de la Finca José Ignacio (sector de la fábrica y de apoyo conectados). Fuente: Adaptado de Semanario Búsqueda, N°1848, 06 diciembre 2015.	137
Ilustración 39 – Envolvente de la Finca José Ignacio. Fuente: Adaptado de Semanario Búsqueda, N°1848, 06 diciembre 2015.	139
Ilustración 40 – Ingreso oeste de la Finca José Ignacio. Fuente: Adaptado de Semanario Búsqueda, N°1848, 06 diciembre 2015.	140

Ilustración 41 – Fachada norte del sector de la fábrica, ladrillos dispuestos en proporción aurea. Fuente: ARQ / AR. Edificios industriales: Almazara Finca José Ignacio, 14 septiembre 2015....	141
Ilustración 42 – Costa Urbana Shopping. Fotografía. Recuperado de https://media-cdn.tripadvisor.com/media/photo-s/09/55/6d/35/costa-urbana-shopping	142
Ilustración 43 – Modelo 3D del Costa Urbana Shopping representando el puente aéreo que conecta los dos volúmenes del edificio. Fuente: Revit.....	143
Ilustración 44 – Fachada del edificio Costa Urbana Shopping. Fuente: https://www.astori.com.uy/arquitectura/item/costa-urbana.html	144
Ilustración 45 – Foto de la construcción del Estadio Parque Roca Fuente: Summa+ N° 93, Estadio Parque Roca. 13 de abril de 2009.	145
Ilustración 46 – Planta e cortes do Estádio Parque Roca. Fuente: Summa+ N° 93, Estadio Parque Roca. 13 de abril de 2009.....	146
Ilustración 47 – Hotel Griffa, Rosario (Santa Fe). Fuente: Clarín, 2020.....	148
Ilustración 48 – Recorte del estudio. Planta del primer piso indicando en amarillo el recorte del estudio. En rojo se ve los accesos indicados Fuente: Elaboración propia.....	149
Ilustración 49 - Porcentaje de influencia de los parámetros de la envolvente edilicia en la eficiencia energética para la demanda de calefacción. Fuente: SPMF.....	150
Ilustración 50 – Porcentaje de influencia de los parámetros de la envolvente edilicia en la eficiencia energética para la demanda de refrigeración. Fuente: SPMF.....	150
Ilustración 51 – Pabellón Verde. Complejo Ferial Córdoba (Córdoba, Argentina). Fuente: Autora.....	154
Ilustración 52 – Plano del Pabellón Verde. Complejo Ferial Córdoba (Córdoba, Argentina). Recuperado de https://complejoferialcordoba.com.ar/espacios	155
Ilustración 53 – SUM Pabellón Verde Complejo Ferial Córdoba: a) modelo computacional; b) fotografía exterior del recinto; fotografía después de la remodelación en 2019.	156
Ilustración 54 – Segunda etapa del MEAP: preprocesamiento de datos. Fuente: Elaboración propia.....	157
Ilustración 55 – Tercera etapa del MEAP: transformación de datos. Fuente: Elaboración propia.....	169
Ilustración 56 – Cuarta etapa del MEAP: minería de datos. Fuente: Elaboración propia.....	172
Ilustración 57 – Quinta etapa del MEAP: interpretación y evaluación. Fuente: Elaboración propia.....	175
Ilustración 58 – Fotos de la Casa Nabuco, en Maldonado, Uruguay. Recuperado de https://www.archdaily.cl/cl/891481/casa-nabuco-pablo-gagliardo/5abad5a5f197cc664000005a-casa-nabuco-pablo-gagliardo	179
Ilustración 59 – Planos de la Casa Nabuco, en Maldonado, Uruguay. Recuperado de https://www.archdaily.cl/cl/891481/casa-nabuco-pablo-gagliardo/5abad5a5f197cc664000005a-casa-nabuco-pablo-gagliardo	180

Ilustración 60 – Publicación de la prueba piloto en la Revista Ecological Informatics, de Elsevier. Fuente: Ecological Informatics 51 (2019) 61-72.	189
Ilustración 61 – Interfaz del plugin PREAPP presentando el origen de los datos ingresados y de la base de datos ya integrada en el plugin. Fuente: PREAPP, elaboración propia.....	208
Ilustración 62 – Interfaz del plugin PREAPP presentando las recomendaciones de diseño, estructuradas según los criterios de evaluación en una escala de 0 a 5. También presenta la opción de “descargar” para descargar el informe del análisis. Fuente: PREAPP, elaboración propia.....	209
Ilustración 63 – Interfaz del plugin PREAPP presentando las recomendaciones de montaje, estructuradas según los criterios de evaluación en una escala de 0 a 5. También presenta la opción de “download” para descargar el informe del análisis. Fuente: PREAPP, elaboración propia.....	210
Ilustración 64 – Interfaz del plugin PREAPP presentando las recomendaciones de uso, estructuradas según los criterios de evaluación en una escala de 0 a 5. También presenta la opción de “download” para descargar el informe del análisis. Fuente: PREAPP, elaboración propia.....	212
Ilustración 65 – Tabla con las reglas del PREAPP para las recomendaciones de diseño, montaje y uso. Fuente: Elaboración propia.	213
Ilustración 66 – Formulario de patentamiento del plugin PREAPP presentado al CONICET. Fuente: CONICET.	216

Listado de tablas

Tabla 1 – Estudios sobre la utilización de la metodología BIM que analizan las características del edificio, la eficiencia y operación del sistema, el comportamiento del ocupante y las condiciones climáticas. Fuente: Elaboración propia.	100
Tabla 2 – Evaluación de criterios y subcriterios esenciales para el análisis y mejora del sistema constructivo prefabricado en hormigón de la empresa Astori. Esta tabla presenta un desglose detallado de los componentes específicos que caen bajo cada criterio general, proporcionando una descripción precisa de su relevancia y función en el contexto de la producción prefabricada en hormigón. Fuente: Elaboración propia.....	108
Tabla 3 – Hallazgos más relevantes obtenidos del análisis detallado realizado con la herramienta SPMF. Se categorizan los resultados en aspectos específicos que influyen en la eficacia de los sistemas prefabricados, tales como combinaciones de componentes, materiales utilizados, técnicas implementadas, tendencias identificadas y otros datos valiosos que surgieron del estudio. Fuente: Elaboración propia.....	114
Tabla 4 - Requisitos físicos del cemento [Requisitos, unidad, mínimo, máximo y método de ensayo]. Fuente: Norma IRAM 50000.	122
Tabla 5 - Requisitos mecánicos del cemento [Categorías, Resistencia a la compresión (MPa) y método de ensayo]. Fuente: Norma IRAM 50000.....	122

Tabla 6 – Evaluación de Impacto Ambiental del Hormigón a través de SimaPro, desglosando el análisis por fases del ciclo de vida y sub-procesos. Fuente: Elaboración propia.	125
Tabla 7 – Datos generales de la Finca José Ignacio. Fuente: Elaboración propia.....	136
Tabla 8 – Datos generales del Costa Urbana Shopping. Fuente: Elaboración propia.....	141
Tabla 9 – Datos generales del Estadio multipropósito Parque Roca. Fuente: Elaboración propia.	144
Tabla 10 – Datos generales del Hotel Griffa. Fuente: Elaboración propia.	147
Tabla 11 - Temperaturas media, máxima y mínima medias exigidas por la norma IRAM. Promedio de los meses de invierno y verano (°C). Fuente: IRAM 11603.....	149
Tabla 12 - Cálculo de la transmitancia y resistencia térmicas de la envolvente vertical y horizontal de paneles de fibrocemento, de acuerdo con la norma IRAM 11605. Fuente: IRAM 11603.....	151
Tabla 13 - Cálculo de la transmitancia y resistencia térmicas de la envolvente vertical y horizontal de acuerdo con la norma IRAM 11605, después de la aplicación de medidas.	152
Tabla 14 – Datos generales del Pabellón Verde. Fuente: Elaboración propia.	153
Tabla 15 – Evaluaciones cuantitativas utilizando los 9 criterios seleccionados. Fuente: Autora..	171
Tabla 16 - Código binario para cada una de las subvariables.	175
Tabla 17 – Especificaciones de cada uno de los ambientes de la prueba piloto. Fuente: SPMF.	182
Tabla 18 – Resultados de la minería de datos con el algoritmo FP-Growth en el software SPMF. Fuente: SPMF.	183

Bibliografía

- Abalos, J., Aragón, A., & Escrig, F. (2018). El uso del sistema Astori en la construcción de edificios. *Revista de la Construcción*, 17, 45-55.
- Alvarez, G., Brasileiro, F., & Silva, N. (2010). A low-cost strategy for improving thermal and visual performance of buildings in Brazil. *Energy and Buildings*, 1710-1717.
- Aránguiz, S., Pizarro, G., Vidal, S., & Valdés, H. (2018). Evaluación comparativa de sistemas constructivos prefabricados en la industria de la construcción chilena. 33, págs. 175-184.
- Aragón, A. (2017). El sistema Astori y su aplicación en la construcción de Costa Urbana Shopping.
- Arayici, Y., Coates, P., Koskela, L., Kagioglou, M., Usher, C., & O'Reilly, K. (2011). Technology adoption in the BIM implementation for lean architectural practice. *Automation in Construction*, 20, 189-195.
- Arroyo, P., García-Segura, T., Yepes, V., & Alcalá, J. (2019). Digital tools for construction processes: A literature review. *Advances in Engineering Software*, 131, 104-121.
- Ashouri, M., Haghighat, F., Fung, A. S., Lazrak, E., & Yoshino, H. (2018). A review of occupancy sensing and occupancy modeling methods for residential buildings. . *Building and Environment*, 90-102.
- ASHRAE. (2009). *Handbook of Fundamentals*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Augenbroe, G., & Park, Y. (2005). *Predictive control of HVAC systems: methods and applications for energy efficiency in buildings*. Springer Science & Business Media.
- Azhar, S., Khalfan, M., Maqsood, T., & Ahmed, S. (2012). Building information modeling (BIM): A new paradigm for visual interactive modeling and simulation for construction projects. *Virtual and Physical Prototyping*, 74, 249-259.

- Barros, J., Fernandes, P., & Branco, F. (2016). Design of Prefabricated Concrete Buildings with Adaptability for Dismounting and Reuse. *Procedia Engineering*, 120-127.
- Beetz, J., van Leeuwen, J., & de Vries, B. (2009). IfcOWL: A case of transforming EXPRESS schemas into ontologies. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 89-101.
- Bilec, M. M., Karatas, S., & Amrehn, M. (2020). Construction Waste Minimization Strategies in Prefabrication Housing Systems: A Comparative Environmental Analysis. *Sustainability*, 544.
- Bilmes, L., Galante, M., & Hurtado, C. (2017). Precast concrete industrialization for sustainable building in Latin America. *Procedia Engineering*, 196, 141-148.
- Borowczyk, A., Badowski, D., & Radziszewski, P. (2020). Structural performance of precast concrete sandwich panels under horizontal loading. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 124–136.
- Cai, Y., Ye, G., & Zhang, Y. (2018). Thermal Performance Evaluation and Application of Precast Concrete Sandwich Panel Walls in China. *Energy Procedia*, 142-147.
- Carlsson, S. A. (2006). Towards an Information Systems De-sign Research Framework: A Critical Realist Perspective. *1st International Conference on Design Science Research in Information Systems and Technology (DESRIST)*. Claremont, California.
- Carmo, R. M., Rebelo, C., & de Brito, J. (2016). The impact of using prefabrication on construction waste reduction. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2163-2170.
- Carrillo, P. C. (2006). Knowledge management in international construction joint ventures. *Journal of Construction Engineering and Management*, 186-195.
- Carrillo, P., & Chinowsky, P. (2006). Knowledge management in international construction joint ventures. *Journal of Construction Engineering and Management*, 186-195.

- Chen, G., Zhang, L., & Li, G. (2016). Life-cycle Cost Analysis Model for Prefabricated Modular Buildings. *Automation in Construction*, 1-11.
- Chen, H., Lu, W., & Wu, X. (2018). Research on BIM-based construction quality management for prefabricated building projects. *Journal of cleaner production*, 187, 855-865.
- Corradi, M., Morandi, F., & Nesi, G. (2018). Thermal performance of innovative prefabricated external walls made of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. *Energy and Buildings*, 169, 466-476.
- De la Fuente, P. (2015). Industrialización de la construcción en la arquitectura moderna. *Tecnología y Arquitectura*, 16, 46-57.
- Delzendeh, R., Wu, Y., Lee, W., & Zhou, Y. (2017). Occupant behavior and building energy efficiency: challenges and interventions. *Proceedings of the 2017 International Conference on Sustainable Energy Engineering* (págs. 236-240). Atlantis Press.
- Duarte, D. C., Teixeira, R., & Cardoso, R. (2021). Economic analysis of industrialized building systems—The case of reinforced concrete elements with self-compacting concrete. *Automation in Construction*.
- Eastman, C. M., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2011). *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers, and contractors*. John Wiley & Sons.
- Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2011). *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors*. John Wiley & Sons.
- Fernández-Tabales, A., Suarez-Burgoa, P., Casanueva, C., & Ramos, M. J. (2017). Aesthetic Integration of Prefabricated Concrete Panels in Architectural Rehabilitation Works: A Case Study. *Buildings*.

- García-Segura, T., Yepes, V., Alcalá, J., & Pérez-López, E. (2019). Multi-objective design of post-tensioned concrete road bridges using artificial intelligence and a co-evolutionary algorithm. *Journal of Cleaner Production*, 211, 1544-1558.
- Gavilanes, J. C., Calvo, R. A., & Bravo, M. (2018). Analysis of the current state of the industrialized construction sector in Latin America. *International Journal of Engineering and Technology*, 10, 171-175.
- Geng, J., Ma, L., & Qian, Q. (2021). Service Life and Maintenance Analysis of Prefabricated Concrete Bridges. *Applied Sciences*.
- Gibb, A. G. (2001). Standardization and pre-assembly-distinguishing myth from reality using case study research. *Construction Management & Economics*, 307-315.
- Gibb, A., & Isack, F. (2003). Re-engineering through pre-assembly: client expectations and drivers. *Building Research & Information*, 146-160.
- Gonzalez, F. F., & Zampirolli, C. E. (2014). Proposta de uma metodologia para gestão do conhecimento em empresas de construção civil. *Perspectivas em Gestão & Conhecimento*, 65-82.
- Gruber, T. R. (1993). A translation approach to portable ontology specifications. *Knowledge Acquisition*, 199-220.
- Han, J., Pei, J., & Yin, Y. (2000). Mining frequent patterns without candidate generation. *Proceedings of the 2000 ACM SIGMOD international conference on Management of data*, 1-12.
- Hernández, C. (2015). Recent developments in architectural fabric structures in Latin America. En *Fabric Structures in Architecture* (págs. 585-660). Woodhead Publishing.
- Hernández, D., Arriaga, F., & Báez, F. (2019). Innovación en la construcción mediante el uso de elementos prefabricados en hormigón. *Revista de Ingeniería Civil*, 33, págs. 191-198.

- Hevner, A. R., March, S. T., Park, J., & Ram, S. (2004). Design science in information systems research. *MIS Quarterly*, 75-105.
- Hinojosa, F., González, V., & Díaz, J. (2017). Innovative design and construction of a prefabricated and modular building using BIM. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 7, 13-18.
- Hinojosa, J., Martín, J. P., & Frías, M. (2020). Durability and Aesthetic Evolution of Prefabricated Ultra-High Performance Concrete Facade Panels. *Sustainability*.
- Holsapple, C. W., & Joshi, K. D. (2001). Knowledge management: A three-fold framework. *Information society*, 17, 47-64.
- Horman, M., & Kenley, R. (2005). Quantifying levels of wasted time in construction with meta-analysis. *Journal of Construction Engineering and Management*, 52-61.
- Jaber, M. Y., Rosado, L. P., Kettleborough, C. F., & Paez, M. (2020). Life Cycle Assessment of Precast Concrete Buildings in Canada: A Comparative Analysis. *Journal of Cleaner Production*, 258.
- Jaselskis, E. J., & Ashley, D. B. (1991). Optimal allocation of project management resources for achieving success. *Journal of Construction Engineering and Management*, 321-340.
- Jun, S., & Cheng, J. (2017). Data mining techniques for the selection of target credits in third-party verification for green buildings. *Journal of Green Building*, 121-138.
- Kamsu-Foguem, B., & Noyes, D. (2013). An approach to aid decision-making in the maintenance of industrial systems. *International Journal of Production Research*, 51, 7221-7236.
- Kelly, R. L. (2013). *he Lifeways of Hunter-Gatherers: The Foraging Spectrum*. Cambridge University Press.

- Kim, J. T., Cheong, K. W., & Jang, Y. J. (2012). Thermal comfort evaluation of natural ventilation and radiant floor cooling system in a school building using subjective and objective methods. *Building and Environment*, 280-288.
- Koskela, L., Kagioglou, M., Tzortzopoulos, P., & Sexton, M. (2002). On the viability of lean construction in the UK. (págs. 1-12). Proceedings of the 10th Annual Conference of the International Group for Lean Construction.
- Lessard, R. B. (2017). *Green Building Standards and Certification Systems: A Review of Sustainability Assessment Tools*. Springer.
- Li, Q., Ding, Z., & Zhao, Y. (2018). A comprehensive review of prefabricated building research in China. *Automation in Construction*, 89, 343-359.
- Lu, W., Chen, K., Xue, F., & Pan, W. (2019). Searching for an optimal level of prefabrication in construction: An analytical framework. *Journal of Cleaner Production*.
- Lu, Y., Zhai, J., Xie, S., Liu, H., & Zhao, L. (2017). Sustainable Construction and Environmental Challenges in the Industrialized Prefabrication of Concrete Structures. *Sustainability*.
- Müller, J., Dotzauer, E., & Voigt, K. (2018). Industry 4.0 and its impact on reshoring decisions of German manufacturing enterprises. *Journal of Manufacturing Technology Management*.
- Maes, M., Creemers, S., De Schutter, G., & Taerwe, L. (2021). Durability of concrete mixtures with recycled aggregates and treated concrete waste. *Construction and Building Materials*.
- March, S. T., & Smith, G. F. (1995). Design and natural science research on information technology. *Decision Support Systems*, 251-266.

- Marinakakis, Y., Doukas, H., & Kontoleon, P. (2018). Exploiting multidisciplinary data in the context of smart cities: the BigDataOcean approach. *Sustainable Cities and Society*, 438-449.
- Menges, A. (2012). *Material Computation: Higher Integration in Morphogenetic Design*.
- Miettinen, R., & Paavola, S. (2014). Benefits and obstacles of building information modeling—Perceptions from Finnish building industry. *Journal of Civil Engineering and Management*, 20, 635-646.
- Minvielle, F. (2018). *El Observador*. Obtenido de <https://www.elobservador.com.uy/nota/el-shopping-costa-urbana-el-mas-moderno-y-grande-de-uruguay-201811611511>
- Moreno, J., García-Segura, T., Yepes, V., & González-Vidoso, F. (2020). Impact of concrete prefabrication on sustainable construction. *Sustainability*, 12.
- Nguyen, T. D., Watanabe, T., Nakagawa, T., & Sato, R. (2019). Sustainability Assessment of Construction Projects in Vietnam: A Comparative Study of Precast and Cast-in-Place Concrete. *Sustainability*.
- O'Keeffe, D. (2013). *Building information modeling for sustainable design and LEED rating analysis*. John Wiley & Sons.
- Oman, A. (2016). Big Data in Construction Engineering and Management. *Journal of Construction Engineering and Management*.
- Onyango, V. (2016). Investigating the integration of building information modeling and lean construction. *Journal of Information Technology in Construction*, 21, 148-157.
- O'Sullivan, J., Keane, M., Kelliher, D., & Hitchcock, D. (2004). Monitoring and targeting energy use in buildings: A review of practice. *Energy and Buildings*, 1013-1038.
- Pacheco-Torgal, F., Tam, V. W., & Ding, Y. (s.f.). *Eco-efficient Construction and Building Materials: Life Cycle Assessment (LCA), Eco-Labeling and Case Studies*. Woodhead Publishing.

- Palmer, J. D. (2012). *The Architect's Studio Companion: Rules of Thumb for Preliminary Design*. John Wiley & Sons.
- Pauwels, P., & Terkaj, W. (2016). EXPRESS to OWL for construction industry: Towards a recommendable and usable ifcOWL ontology. *Automation in Construction*, 100-133.
- Peng, Y., Lin, J., Zhang, X., & Hu, Y. (2017). Integration of Building Information Modeling and Knowledge Management for Building Lifecycle Management. *Journal of Management in Engineering*.
- Pichiliane, P. (2011). *Gestão do conhecimento e inteligência organizacional: conceitos e experiências*. Brasport.
- Piore, M. J., & Sabel, C. F. (1984). *The Second Industrial Divide: Possibilities for Prosperity*. Basic Books.
- Prado, J., Fuentes, J., & Cisternas, L. (2019). Desarrollo de una solución constructiva basada en paneles prefabricados de hormigón armado. *DYNA Ingeniería e Industria*, 94, 154-160.
- Rezgui, Y., Boddy, S., Wetherill, M., & Cooper, G. (2011). Past, present and future of information and knowledge sharing in the construction industry: Towards semantic service-based e-construction? *Computer-Aided Design*, 502-515.
- Sacks, R., Barak, R., Eastman, C., & Lee, G. (2010). Requirements for developing and implementing prefabrication. *Journal of architectural engineering*, 16, 67-73.
- Sacks, R., Eastman, C. M., & Lee, G. (2004). Parametric modeling versus building information modeling: A comparison of benefits and drawbacks. (págs. 1-8). Proceedings of the International Conference on Computing in Civil and Building Engineering.

- Sacks, R., Koskela, L., Dave, B., & Owen, R. (2009). Interaction of lean and building information modeling in construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 136, 968-980.
- Salgin, B., Akgün, A., Cosgun, N., & Agyekum, K. (2017). Construction Waste Reduction Through BIM-Based Site Management Approach. *International Journal of Engineering Technologies IJET*, 9, 135-142.
- Salvador, C., Garcés, P., & Vicente, R. (2017). Lightweight concrete made with expanded polystyrene aggregate: Optimization of thermal and mechanical properties. *Construction and Building Materials*, 131, 281-288.
- Samarasinghe, T., Mendis, P., Ngo, T., & Fernando, W. (2015). *BIM Software Framework for Prefabricated Construction: Case Study Demonstrating BIM Implementation on a Modular House*, 142.
- Samuel, F. (2010). *Le Corbusier and the Architectural Promenade*. Birkhäuser.
- Sargiotti, R. (2013). Sistemas premoldeados en hormigón. El caso Astori. Córdoba (1959-1982). En *Actas de las Segundas Jornadas de la Arquitectura y la Ciudad* (págs. 16-23). Buenos Aires: Universidad Torcuato Di Tella.
- Schodek, D., Bechthold, M., Griggs, K., Kao, K. M., & Steinberg, M. (2005). *Digital Design and Manufacturing: CAD/CAM Applications in Architecture and Design*. John Wiley & Son.
- Shen, Q., Liu, G., & Wang, Y. (2016). Integration of BIM and fuzzy comprehensive evaluation for risk assessment in underground engineering. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 30.
- Simon, H. A. (1996). *The Sciences of the Artificial (3rd ed.)*. MIT Press.
- Smith, D. K. (2014). *Fundamentals of building information modeling*. John Wiley & Sons.
- Studer, R., Benjamins, V. R., & Fensel, D. (1998). Knowledge engineering: principles and methods. *Data & Knowledge Engineering*, 161-197.

- Succar, B. (2009). Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders. *Automation in Construction*, 357-375.
- Sulankivi, K., Lehtovaara, P., & Saari, A. (2010). Building information modeling in Finland: review and outlook. *Journal of Civil Engineering and Management*, 16, 451-460.
- Takeda, H., Veerkamp, P., Tomiyama, T., & Yoshikawa, H. (1990). Modeling design processes. *AI Magazine*, 37-48.
- Tauriainen, M., Kerosuo, H., & Nicklisch, F. (2016). Lean management and the integrated design and delivery solutions. *Journal of Management in Engineering*, 32.
- Uschold, M., & Gruninger, M. (1996). Ontologies: Principles, methods and applications. *Knowledge Engineering Review*, 93-136.
- Vissotto, E. J., & Camargo, A. A. (2013). Data mining in building information modeling: thermal performance analysis. *WIT Transactions on Information and Communication Technologies*, 48, 135-145.
- Walls, J. G., Widmeyer, G. R., & El Sawy, O. A. (2004). Assessing information system design theory in perspective: how useful was our 1992 initial rendition. *Journal of Information Technology Theory and Application*, 43-58.
- Wang, Z., Yu, H., Liu, Y., Hu, X., & Xie, Z. (2019). Parametric Design and Automated Fabrication of Multi-Functional Precast Concrete Wall Panels for Sustainable Buildings. *Journal of Cleaner Production*, 815–831.
- Woodbury, R. (2010). *Elements of Parametric Design*.
- Yan, J., Chen, M., & Lin, Y. (2018). Life Cycle Assessment of Precast Concrete Structures: A Case Study of a Prefabricated Villa. *Sustainability*.
- Yang, Z., Ma, Z., Wang, M., & Shao, L. (2020). A prefabricated construction method for modular buildings using dry connections. *Automation in Construction*(111).

- Yañez, C., Muñoz, M., & Hidalgo, S. (2018). Evaluación comparativa de sistemas constructivos prefabricados de hormigón para viviendas sociales en Chile. *Revista Ingeniería de Construcción*, 33, págs. 143-156.
- Yu, E. S., Mylopoulos, J., & Lesperance, Y. (2006). From analysis to design: Using knowledge engineering to reverse engineer legacy systems. 21, 343-361.
- Zabalza, I., Capilla, A. V., & Usón, A. A. (2011). Environmental impact assessment of buildings: A comparative study between Spain and the United Kingdom. *Building and Environment*, 2335-2343.
- Zhou, Y., & Yang, H. (2016). A review of data mining applications for quality improvement in building energy performance. *Energy and Buildings*, 319-330.

Anexos

Temperatura

```
# TEMPERATURA

# Comparación para el tipo de concreto
if temperatura_ciudad >= 10 and temperatura_ciudad <= 32:
    tipo_concreto = "concreto convencional"
else:
    tipo_concreto = "concreto de alta resistência"

# Comparación para el tamaño y forma de los elementos prefabricados
if temperatura_ciudad >= 25:
    tamano_forma = "Grandes elementos con forma rectangular"
elif temperatura_ciudad >= 20:
    tamano_forma = "Pequeños elementos con forma curva"
elif temperatura_ciudad >= 15:
    tamano_forma = "Pequeños elementos con forma rectangular"
else:
    tamano_forma = "Grandes elementos con forma curva"

# Comparación para los métodos de unión
if temperatura_ciudad >= 30:
    metodo_union = "Soldadura"
elif temperatura_ciudad >= 25:
    metodo_union = "Tornillos"
elif temperatura_ciudad >= 20:
    metodo_union = "Adhesivo"
else:
    metodo_union = "Encaje"

# Comparación para el tipo de refuerzo
if temperatura_ciudad >= 20:
    tipo_refuerzo = "acero de alta resistencia"
elif temperatura_ciudad >= 15:
    tipo_refuerzo = "fibra de carbono"
else:
    tipo_refuerzo = "acero convencional"

# Comparación para las técnicas de acabado superficial
if temperatura_ciudad >= 20:
    acabado_superficial = "Acabado texturizado"
elif temperatura_ciudad >= 15:
    acabado_superficial = "Acabado colorido"
```



```

elif temperatura_ciudad >= 10:
    acabado_superficial = "Acabado con revestimiento"
else:
    acabado_superficial = "Acabado liso"

# Comparación para la geometría y disposición de los elementos prefabricados
if temperatura_ciudad >= 25:
    geometria_disposicion = "Pared curva"
elif temperatura_ciudad >= 20:
    geometria_disposicion = "Pilar circular"
elif temperatura_ciudad >= 15:
    geometria_disposicion = "Pared recta"
else:
    geometria_disposicion = "Pilar rectangular"

# Comparación para la secuencia de montaje y procedimientos de elevación de
los elementos prefabricados
if temperatura_ciudad >= 25:
    secuencia_montaje = "Montaje vertical con grúa móvil"
elif temperatura_ciudad >= 20:
    secuencia_montaje = "Montaje en voladizo"
elif temperatura_ciudad >= 15:
    secuencia_montaje = "Montaje vertical con grúa"
else:
    secuencia_montaje = "Montaje horizontal"

# Comparación para los sistemas de anclaje y fijación de los elementos
prefabricados
if temperatura_ciudad >= 30:
    sistemas_anclaje = "Conectores de fibra de carbono"
elif temperatura_ciudad >= 25:
    sistemas_anclaje = "Conectores de acero"
elif temperatura_ciudad >= 20:
    sistemas_anclaje = "Anclajes químicos"
else:
    sistemas_anclaje = "Anclajes metálicos"

```

Humedad

```

# HUMEDAD

# Comparación para el tipo de concreto
if humedad_ciudad >= 60:
    tipo_concreto = "concreto convencional"
else:
    tipo_concreto = "concreto de alta resistencia"

```

```

# Comparación para el tamaño y forma de los elementos prefabricados
if humedad_ciudad >= 80:
    tamano_forma = "Grandes elementos con forma rectangular"
elif humedad_ciudad >= 70:
    tamano_forma = "Pequeños elementos con forma curva"
elif humedad_ciudad >= 60:
    tamano_forma = "Pequeños elementos con forma rectangular"
else:
    tamano_forma = "Grandes elementos con forma curva"

# Comparación para los métodos de unión
if humedad_ciudad >= 90:
    metodo_union = "Soldadura"
elif humedad_ciudad >= 80:
    metodo_union = "Tornillos"
elif humedad_ciudad >= 70:
    metodo_union = "Adhesivo"
else:
    metodo_union = "Encaje"

# Comparación para el tipo de refuerzo
if humedad_ciudad >= 70:
    tipo_refuerzo = "acero de alta resistencia"
elif humedad_ciudad >= 60:
    tipo_refuerzo = "fibra de carbono"
else:
    tipo_refuerzo = "acero convencional"

# Comparación para las técnicas de acabado superficial
if humedad_ciudad >= 80:
    acabado_superficial = "Acabado texturizado"
elif humedad_ciudad >= 70:
    acabado_superficial = "Acabado colorido"
elif humedad_ciudad >= 60:
    acabado_superficial = "Acabado con revestimiento"
else:
    acabado_superficial = "Acabado liso"

# Comparación para la geometría y disposición de los elementos prefabricados
if humedad_ciudad >= 80:
    geometria_disposicion = "Pared curva"
elif humedad_ciudad >= 70:
    geometria_disposicion = "Pilar circular"
elif humedad_ciudad >= 60:
    geometria_disposicion = "Pared recta"
else:
    geometria_disposicion = "Pilar rectangular"

```

```

# Comparación para la secuencia de montaje y procedimientos de elevación de
los elementos prefabricados
if humedad_ciudad >= 80:
    secuencia_montaje = "Montaje vertical con grúa móvil"
elif humedad_ciudad >= 70:
    secuencia_montaje = "Montaje en voladizo"
elif humedad_ciudad >= 60:
    secuencia_montaje = "Montaje vertical con grúa"
else:
    secuencia_montaje = "Montaje horizontal"

# Comparación para los sistemas de anclaje y fijación de los elementos
prefabricados
if humedad_ciudad >= 90:
    sistemas_anclaje = "Conectores de fibra de carbono"
elif humedad_ciudad >= 80:
    sistemas_anclaje = "Conectores de acero"
elif humedad_ciudad >= 70:
    sistemas_anclaje = "Anclajes químicos"
else:
    sistemas_anclaje = "Anclajes metálicos"

```

Velocidad del viento

```

#VELOCIDAD DEL VIENTO

# Comparación para el tipo de concreto
if velocidad_viento <= 40:
    tipo_concreto = "concreto convencional"
else:
    tipo_concreto = "concreto de alta resistencia"

# Comparación para el tamaño y forma de los elementos prefabricados
if velocidad_viento <= 30:
    tamano_forma = "Pequeños elementos con forma rectangular"
elif velocidad_viento <= 40:
    tamano_forma = "Pequeños elementos con forma curva"
elif velocidad_viento <= 50:
    tamano_forma = "Grandes elementos con forma rectangular"
else:
    tamano_forma = "Grandes elementos con forma curva"

# Comparación para los métodos de unión
if velocidad_viento <= 30:
    metodo_union = "Encaje"
elif velocidad_viento <= 40:
    metodo_union = "Soldadura"

```

```

elif velocidad_viento <= 50:
    metodo_union = "Tornillos"
else:
    metodo_union = "Adhesivo"

# Comparación para el tipo de refuerzo
if velocidad_viento <= 40:
    tipo_refuerzo = "acero convencional"
elif velocidad_viento <= 50:
    tipo_refuerzo = "acero de alta resistencia"
else:
    tipo_refuerzo = "fibra de carbono"

# Comparación para las técnicas de acabado superficial
if velocidad_viento <= 30:
    acabado_superficial = "Acabado liso"
elif velocidad_viento <= 40:
    acabado_superficial = "Acabado texturizado"
elif velocidad_viento <= 50:
    acabado_superficial = "Acabado colorido"
else:
    acabado_superficial = "Acabado con revestimiento"

# Comparación para la geometría y disposición de los elementos prefabricados
if velocidad_viento <= 30:
    geometria_disposicion = "Pared recta"
elif velocidad_viento <= 40:
    geometria_disposicion = "Pared curva"
elif velocidad_viento <= 50:
    geometria_disposicion = "Pilar rectangular"
else:
    geometria_disposicion = "Pilar circular"

# Comparación para la secuencia de montaje y procedimientos de elevación de
los elementos prefabricados
if velocidad_viento <= 30:
    secuencia_montaje = "Montaje horizontal"
elif velocidad_viento <= 40:
    secuencia_montaje = "Montaje vertical con grúa"
elif velocidad_viento <= 50:
    secuencia_montaje = "Montaje vertical con grúa móvil"
else:
    secuencia_montaje = "Montaje en voladizo"

# Comparación para los sistemas de anclaje y fijación de los elementos
prefabricados
if velocidad_viento <= 30:
    sistemas_anclaje = "Anclajes metálicos"

```

```

elif velocidad_viento <= 40:
    sistemas_anclaje = "Anclajes químicos"
elif velocidad_viento <= 50:
    sistemas_anclaje = "Conectores de acero"
else:
    sistemas_anclaje = "Conectores de fibra de carbono"

```

Dirección de la fachada

```

# DIRECCIÓN DE LA FACHADA

# Comparación para el tipo de concreto
if direccion_fachada in ["Frente al viento", "Opuesta al viento"]:
    tipo_concreto = "concreto convencional"
else:
    tipo_concreto = "concreto de alta resistencia"

# Comparación para el tamaño y forma de los elementos prefabricados
if direccion_fachada in ["Frente al viento"]:
    tamano_forma = "Pequeños elementos con forma rectangular"
elif direccion_fachada in ["Perpendicular al viento"]:
    tamano_forma = "Pequeños elementos con forma curva"
elif direccion_fachada in ["Opuesta al viento"]:
    tamano_forma = "Grandes elementos con forma rectangular"
else:
    tamano_forma = "Grandes elementos con forma curva"

# Comparación para los métodos de unión
if direccion_fachada in ["Frente al viento"]:
    metodo_union = "Encaje"
elif direccion_fachada in ["Opuesta al viento"]:
    metodo_union = "Soldadura"
elif direccion_fachada in ["Diagonal al viento"]:
    metodo_union = "Tornillos"
else:
    metodo_union = "Adhesivo"

# Comparación para el tipo de refuerzo
if direccion_fachada in ["Frente al viento"]:
    tipo_refuerzo = "acero convencional"
elif direccion_fachada == "Diagonal al viento":
    tipo_refuerzo = "fibra de carbono"
else:
    tipo_refuerzo = "acero de alta resistencia"

# Comparación para las técnicas de acabado superficial
if direccion_fachada in ["Frente al viento"]:

```

```

    tecnica_acabado = "Acabado liso"
elif direccion_fachada in ["Perpendicular al viento"]:
    tecnica_acabado = "Acabado texturizado"
elif direccion_fachada == "Diagonal al viento":
    tecnica_acabado = "Acabado colorido"
else:
    tecnica_acabado = "Acabado con revestimiento"

# Comparación para la geometría y disposición de los elementos prefabricados
if direccion_fachada in ["Perpendicular al viento"]:
    geometria_disposicion = "Pared recta"
elif direccion_fachada in ["Frente al viento"]:
    geometria_disposicion = "Pared curva"
elif direccion_fachada in ["Opuesta al viento"]:
    geometria_disposicion = "Pilar rectangular"
else:
    geometria_disposicion = "Pilar circular"

# Comparación para la secuencia de montaje y procedimientos de elevación de
los elementos prefabricados
if direccion_fachada in ["Frente al viento"]:
    secuencia_montaje = "Montaje horizontal"
elif direccion_fachada in ["Perpendicular al viento"]:
    secuencia_montaje = "Montaje vertical con grúa"
elif direccion_fachada == "opuesta al viento":
    secuencia_montaje = "Montaje vertical con grúa móvil"
else:
    secuencia_montaje = "Montaje en voladizo"

# Comparación para los sistemas de anclaje y fijación de los elementos
prefabricados
if direccion_fachada in ["Frente al viento"]:
    sistema_anclaje = "Anclajes metálicos"
elif direccion_fachada in ["Perpendicular al viento"]:
    sistemas_anclaje = "Anclajes químicos"
elif direccion_fachada == "Opuesta al viento":
    sistemas_anclaje = "Conectores de acero"
else:
    sistemas_anclaje = "Conectores de fibra de carbono"

```

Azimuth solar

```

# AZIMUT SOLAR

# Comparación para el tipo de concreto
if azimuth_solar >= 0 and azimuth_solar <= 90:

```

```

    tipo_concreto = "concreto convencional"
else:
    tipo_concreto = "concreto de alta resistencia"

# Comparación para el tamaño y forma de los elementos prefabricados
if azimut_solar >= 0 and azimut_solar <= 45:
    tamanho_forma = "Pequeños elementos con forma rectangular"
elif azimut_solar > 45 and azimut_solar <= 90:
    tamanho_forma = "Pequeños elementos con forma curva"
elif azimut_solar > 90 and azimut_solar <= 135:
    tamanho_forma = "Grandes elementos con forma rectangular"
else:
    tamanho_forma = "Grandes elementos con forma curva"

# Comparación para los métodos de unión
if azimut_solar >= 0 and azimut_solar <= 45:
    metodo_union = "Encaje"
elif azimut_solar > 45 and azimut_solar <= 90:
    metodo_union = "Soldadura"
elif azimut_solar > 90 and azimut_solar <= 135:
    metodo_union = "Tornillos"
else:
    metodo_union = "Adhesivo"

# Comparación para el tipo de refuerzo
if azimut_solar >= 0 and azimut_solar <= 90:
    tipo_refuerzo = "acero convencional"
elif azimut_solar > 90 and azimut_solar <= 135:
    tipo_refuerzo = "acero de alta resistencia"
else:
    tipo_refuerzo = "fibra de carbono"

# Comparación para las técnicas de acabado superficial
if azimut_solar >= 0 and azimut_solar <= 45:
    tecnica_acabado = "Acabado liso"
elif azimut_solar > 45 and azimut_solar <= 90:
    tecnica_acabado = "Acabado texturizado"
elif azimut_solar > 90 and azimut_solar <= 135:
    tecnica_acabado = "Acabado colorido"
else:
    tecnica_acabado = "Acabado con revestimiento"

# Comparación para la geometría y disposición de los elementos prefabricados
if azimut_solar >= 0 and azimut_solar <= 45:
    geometria_disposicion = "Pared recta"
elif azimut_solar > 45 and azimut_solar <= 90:
    geometria_disposicion = "Pared curva"
elif azimut_solar > 90 and azimut_solar <= 135:

```

```

    geometria_disposicion = "Pilar rectangular"
else:
    geometria_disposicion = "Pilar circular"

# Comparación para la secuencia de montaje y procedimientos de elevación de
los elementos prefabricados
if azimut_solar >= 0 and azimut_solar <= 45:
    secuencia_montaje = "Montaje horizontal"
elif azimut_solar > 45 and azimut_solar <= 90:
    secuencia_montaje = "Montaje vertical con grúa"
elif azimut_solar > 90 and azimut_solar <= 135:
    secuencia_montaje = "Montaje vertical con grúa móvil"
else:
    secuencia_montaje = "Montaje en voladizo"

# Comparación para los sistemas de anclaje y fijación de los elementos
prefabricados
if azimut_solar >= 0 and azimut_solar <= 45:
    sistema_anclaje = "Anclajes metálicos"
elif azimut_solar > 45 and azimut_solar <= 90:
    sistema_anclaje = "Anclajes químicos"
elif azimut_solar > 90 and azimut_solar <= 135:
    sistema_anclaje = "Conectores de acero"
else:
    sistema_anclaje = "Conectores de fibra de carbono"

```

Uso

```

#TABLA USO

if tipo_construccion == "residencial":
    # Directrices para la construcción residencial
    print("La construcción es de tipo residencial.")
    print("Directrices para la construcción residencial:")
    print("- Utilizar sistemas constructivos prefabricados en hormigón de
tipo", tipo_concreto, "para agilizar el proceso de construcción y mejorar la
calidad de la vivienda.")
    print("- Emplear", tamanho_forma_elementos, "para elementos prefabricados,
los cuales pueden ser producidos en serie y facilitar el montaje.")
    print("- Utilizar", metodos_union, "como método de unión de los elementos
prefabricados, que proporciona una conexión rápida y eficiente.")
    print("- Considerar el uso de refuerzo de", tipo_refuerzo, "para
garantizar la resistencia estructural de los elementos prefabricados.")
    print("- Aplicar", acabado_superficial, "para obtener un aspecto estético
deseado en los elementos prefabricados.")

```



```

    print("- Diseñar", geometria_elementos, "para los elementos prefabricados
de paredes, lo cual permite un montaje más sencillo y eficiente.")
    print("- Seguir una", secuencia_montaje, "de los elementos prefabricados
en el proceso de montaje para una mayor eficiencia y seguridad.")
    print("- Utilizar", sistemas_ancraje, "como método de anclaje y fijación
de los elementos prefabricados, garantizando una conexión segura y duradera.")

if tipo_construccion == "comercial":
    # Directrices para la construcción comercial
    print("La construcción es de tipo comercial.")
    print("Directrices para la construcción comercial:")
    print("- Utilizar sistemas constructivos prefabricados en hormigón de
tipo", tipo_concreto, "para garantizar la resistencia y durabilidad requeridas
en edificaciones comerciales.")
    print("- Emplear", tamanho_forma_elementos, "para elementos prefabricados,
que permiten construir rápidamente grandes estructuras comerciales.")
    print("- Utilizar", metodos_union, "como método de unión de los elementos
prefabricados, brindando una conexión resistente en estructuras comerciales
sometidas a cargas elevadas.")
    print("- Considerar el uso de refuerzo de", tipo_refuerzo, "para
proporcionar una mayor resistencia estructural en construcciones comerciales
de mayor envergadura.")
    print("- Aplicar", acabado_superficial, "para lograr una apariencia
estética y texturizada que se ajuste al estilo comercial deseado.")
    print("- Diseñar", geometria_elementos, "para los elementos prefabricados
de paredes, creando una estética curva que distinga el diseño comercial.")
    print("- Seguir una", secuencia_montaje, "de los elementos prefabricados
mediante grúas para un montaje vertical eficiente y seguro.")
    print("- Utilizar", sistemas_ancraje, "como método de anclaje y fijación
de los elementos prefabricados, garantizando una conexión química fuerte y
duradera en estructuras comerciales.")

if tipo_construccion == "industrial":
    # Directrices para la construcción industrial
    print("La construcción es de tipo industrial.")
    print("Directrices para la construcción industrial:")
    print("- Utilizar sistemas constructivos prefabricados en hormigón de
tipo", tipo_concreto, "para resistir cargas y condiciones rigurosas propias de
instalaciones industriales.")
    print("- Emplear", tamanho_forma_elementos, "para elementos prefabricados,
adecuados para construir estructuras complejas y curvas en entornos
industriales.")
    print("- Utilizar", metodos_union, "como método de unión de los elementos
prefabricados, ofreciendo una conexión segura y resistente en estructuras
industriales sometidas a vibraciones y movimientos.")
    print("- Considerar el uso de refuerzo de", tipo_refuerzo, "para
proporcionar una alta resistencia y durabilidad en condiciones industriales
exigentes.")

```

```

    print("- Aplicar", acabado_superficial, "para obtener un aspecto visual
atractivo y protección adicional en entornos industriales.")
    print("- Diseñar", geometria_elementos, "para los elementos prefabricados
de pilares, proporcionando una forma rectangular que se ajuste a las
necesidades industriales.")
    print("- Seguir una", secuencia_montaje, "de los elementos prefabricados
utilizando grúas móviles para una instalación vertical eficiente y segura en
entornos industriales.")
    print("- Utilizar", sistemas_anclaje, "como método de anclaje y fijación
de los elementos prefabricados, garantizando una conexión segura y resistente
en entornos industriales.")

if tipo_construccion == "institucional":
    # Directrices para la construcción institucional
    print("La construcción es de tipo institucional.")
    print("Directrices para la construcción institucional:")
    print("- Utilizar sistemas constructivos prefabricados en hormigón de
tipo", tipo_concreto, "para edificaciones institucionales que requieren
soluciones versátiles y de calidad.")
    print("- Emplear", tamanho_forma_elementos, "para elementos prefabricados,
permitiendo una producción en serie y montaje rápido en proyectos
institucionales.")
    print("- Utilizar", metodos_union, "como método de unión de los elementos
prefabricados, ofreciendo una conexión segura y eficiente en construcciones
institucionales de menor escala.")
    print("- Considerar el uso de refuerzo de", tipo_refuerzo, "para
proporcionar una resistencia adecuada en estructuras institucionales de carga
moderada.")
    print("- Aplicar", acabado_superficial, "para lograr un acabado estético y
liso en construcciones institucionales.")
    print("- Diseñar", geometria_elementos, "para los elementos prefabricados
de paredes, brindando una estructura recta y simplificada en proyectos
institucionales.")
    print("- Seguir una", secuencia_montaje, "de los elementos prefabricados
utilizando montaje horizontal, lo cual facilita la construcción y el control
de calidad en proyectos institucionales.")
    print("- Utilizar", sistemas_anclaje, "como método de anclaje y fijación
de los elementos prefabricados, proporcionando una conexión segura y
resistente en estructuras institucionales.")

if tipo_construccion == "hotelero":
    # Directrices para la construcción hotelera
    print("La construcción es de tipo hotelero.")
    print("Directrices para la construcción hotelera:")
    print("- Utilizar sistemas constructivos prefabricados en hormigón de
tipo", tipo_concreto, "para hoteles que requieren una construcción duradera y
resistente.")

```

```

        print("- Emplear", tamanho_forma_elementos, "para elementos prefabricados,
permitiendo estructuras grandes y formas rectangulares en proyectos
hoteleros.")
        print("- Utilizar", metodos_union, "como método de unión de los elementos
prefabricados, ofreciendo una conexión sólida y confiable en estructuras
hoteleras.")
        print("- Considerar el uso de refuerzo de", tipo_refuerzo, "para
proporcionar la resistencia necesaria en edificios hoteleros de carga
considerable.")
        print("- Aplicar", acabado_superficial, "para obtener un acabado colorido
y atractivo estéticamente en construcciones hoteleras.")
        print("- Diseñar", geometria_elementos, "para los elementos prefabricados
de pilares, brindando una estructura rectangular y robusta en proyectos
hoteleros.")
        print("- Seguir una", secuencia_montaje, "de los elementos prefabricados
utilizando el montaje vertical con grúa móvil, lo cual permite una
construcción eficiente en proyectos hoteleros.")
        print("- Utilizar", sistemas_anclaje, "como método de anclaje y fijación
de los elementos prefabricados, garantizando una conexión segura y resistente
en estructuras hoteleras.")

if tipo_construccion == "cultural":
    # Directrices para la construcción cultural
    print("La construcción es de tipo cultural.")
    print("Directrices para la construcción cultural:")
    print("- Utilizar sistemas constructivos prefabricados en hormigón de
tipo", tipo_concreto, "para proyectos culturales que requieren una
construcción versátil y estéticamente agradable.")
    print("- Emplear", tamanho_forma_elementos, "para elementos prefabricados,
permitiendo formas curvas y diseño arquitectónico en proyectos culturales.")
    print("- Utilizar", metodos_union, "como método de unión de los elementos
prefabricados, ofreciendo una unión fuerte y duradera en estructuras
culturales.")
    print("- Considerar el uso de refuerzo de", tipo_refuerzo, "para
proporcionar resistencia y ligereza en construcciones culturales.")
    print("- Aplicar", acabado_superficial, "para obtener un acabado estético
y protección adicional en construcciones culturales.")
    print("- Diseñar", geometria_elementos, "para los elementos prefabricados
de paredes, brindando formas curvas y dinamismo en proyectos culturales.")
    print("- Seguir una", secuencia_montaje, "de los elementos prefabricados
utilizando el montaje en voladizo, lo cual permite una construcción eficiente
en proyectos culturales.")
    print("- Utilizar", sistemas_anclaje, "como método de anclaje y fijación
de los elementos prefabricados, garantizando una conexión segura y resistente
en estructuras culturales.")

```

