

Martínez Aires, M.D, Aguilar-Aguilera, A., de la Hoz-Torres, M.L., Durán-Álvarez, J. (2024) Prefabricación y Prevención a través del Diseño: caso de estudio en fachadas prefabricadas. En Herrera, R.F., Salazar, L.A., (Editores), *Actas de congreso del IX Congreso Iberoamericano de Gestión y tecnología de la Construcción* (IX ELAGEC2024).

PREFABRICACIÓN Y PREVENCIÓN A TRAVÉS DEL DISEÑO: CASO DE ESTUDIO EN FACHADAS PREFABRICADAS

M^a Dolores Martínez Aires*¹ – aires@ugr.es

Antonio Aguilar-Aguilera *¹ – antojes@ugr.es

M^a Luisa de la Hoz-Torres*¹ – mlhoz@ugr.es

Joaquín Durán Álvarez*¹ – jdaeuat@ugr.es

*¹*Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación. Universidad de Granada, Granada, España*

RESUMEN

El empleo generado en el sector de la construcción tiene un gran impacto en la economía mundial, no obstante, se enfrenta a altos índices de siniestralidad laboral provocando costes humanos y económicos. La prefabricación, mediante la fabricación de componentes en ambientes controlados, emerge como una solución prometedora para mitigar riesgos asociados con los trabajadores en obra. Este artículo examina el papel de la prefabricación en la mejora de la seguridad y salud (S&S) en la industria de la construcción, enfocándose en la aplicación de la Prevención a través del Diseño (PtD). Se discuten los beneficios clave como la reducción de tiempos de construcción y costes, además de mejoras en la calidad y seguridad del producto final. A través de un estudio de caso sobre fachadas prefabricadas, se analiza el papel de la PtD y cómo puede optimizar la seguridad durante la instalación de las estas. Este enfoque integrativo sugiere que la implementación estratégica de PtD junto con la prefabricación, así como metodologías avanzadas de gestión de proyecto como el *Lean Construction* y el *Building Information Modeling*, puede transformar positivamente las prácticas de S&S en la construcción.

PALABRAS CLAVE

Prevención a través del Diseño; prefabricación; fachadas; puesta en obra; construcción.

INTRODUCCIÓN

El sector de la construcción emplea a más de 250 millones de personas en todo el mundo, lo que representa un 7,7 % del empleo global (Acolin et al., 2021). En la Unión Europea (UE-27), 13 millones de trabajadores forman parte de este sector, lo que equivale al 6,6 % del empleo total y al 29,8 % del empleo industrial (FIEC, 2022).

Sin embargo, a pesar de su significativa contribución al empleo, la Organización Internacional del Trabajo advierte que el sector de la construcción tiene una alta incidencia de accidentes laborales, siendo uno de los más peligrosos (ILO, 2024). Por ejemplo, en 2021, más de una quinta parte (22,5 %) de todos los accidentes laborales mortales en la UE ocurrieron en el sector de la construcción (Comisión Europea, 2021). Estos datos resaltan la necesidad de implementar y mantener estrictas medidas de Seguridad y Salud (S&S) para reducir la siniestralidad laboral y proteger a los trabajadores

Una de las oportunidades más prometedoras para reducir la siniestralidad en el sector de la construcción es la industrialización de los procesos, lo que constituye un nuevo paradigma en el sector (Toole and Gambatese, 2008). Concretamente, la prefabricación, que implica la fabricación de componentes de construcción en un entorno controlado fuera del sitio, ha demostrado mejorar significativamente los resultados de S&S en las obras (Alasmari et al., 2022; Chauhan et al., 2024). En la última década, su demanda está aumentando debido a una necesidad significativamente mayor de materiales rentables, seguros y sostenibles (MordorIntelligence, 2024). Este escenario plantea nuevos desafíos en materia de S&S, para los cuales las tecnologías de la Industria 4.0 ofrecen soluciones innovadoras y efectivas (Smallwood and Allen, 2023).

En este contexto, es más necesario que nunca definir los procesos productivos desde las primeras etapas del proyecto, entrando en juego la denominada Prevención a través del Diseño (PtD) (Toole and Gambatese, 2008).

Este trabajo, se analiza cómo la prefabricación puede ser una oportunidad para la mejora de la S&S de la mano de la PtD. Con este objetivo, se presenta un estudio de caso sobre la aplicación de PtD en las fachadas prefabricadas. El estudio incluye una revisión del estado actual de la prefabricación en la construcción, así como una explicación del concepto de PtD. La aplicación de PtD en el diseño y la fabricación de fachadas prefabricadas no solo optimiza los procesos constructivos al reducir los riesgos en el sitio, sino que también fomenta prácticas más seguras y eficientes en el sector.

Al analizar un estudio de caso sobre la implementación de esta estrategia en fachadas prefabricadas, este trabajo resalta cómo la integración de PtD en la prefabricación puede transformar positivamente los estándares de seguridad y sostenibilidad en la industria de la construcción.

LA PREFABRICACIÓN EN EL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN

ESTADO ACTUAL DE LA PREFABRICACIÓN EN LA CONSTRUCCIÓN

El origen de la prefabricación se remonta al siglo XVII, cuando en 1624 el carpintero inglés Nicholas Barbon envió una casa de madera prefabricada desde Inglaterra a las colonias americanas (Smith, 2010). La ‘Prefabricación’ (Construcción prefabricada) se conoce con diversos términos genéricos en el lenguaje científico, tales como: ‘*Manufactured construction*’, ‘*off-site construction*’, ‘*off-site manufacturing*’, ‘*industrialised building systems*’ y ‘*modern methods of construction*’.

La prefabricación busca realizar la construcción en un entorno controlado dentro de fábricas (Arif and Egbu, 2010). De esta forma, la construcción prefabricada puede proporcionar una serie de beneficios específicos, tales como mayor velocidad de construcción, mejora de la calidad de los productos, métodos más eficientes y sostenibles en la construcción, disminución de los costes y reducción de operarios en obra (Mullens and Arif, 2006; Yuan et al., 2022).

Estas ventajas están impulsando un notable crecimiento global en la construcción prefabricada, incluida la construcción modular. En 2022, la industria de la construcción modular tuvo un valor de aproximadamente 72.1 mil millones de USD y se estima que alcanzará los 114.78 mil millones de USD para 2028, con una tasa de crecimiento anual compuesta del 7.42% durante el período de 2023-2028 (Blanco et al., 2023).



Figura 1. Baño prefabricado. Fuente: Los autores

Además, la prefabricación puede ser una herramienta para la mejora de la S&S en obra (Vithanage et al., 2022a; Vithanage et al., 2022b), promoviendo métodos de trabajo más seguros y requiriendo operarios más especializados y cualificados, lo que también hace que se vean reducidos de forma significativa los accidentes laborales del sector (Gómez Jáuregui, 2009). Por ejemplo, la utilización de elementos fabricados previamente, como baños prefabricados (ver Figura 1) o componentes como armaduras, perfiles ensamblados y ventanas, facilita la eliminación de riesgos asociados a caídas desde alturas y atrapamientos en zanjas, ya que muchas conexiones se realizan fuera del sitio (Gambatese et al., 2008; Toole & Gambatese, 2006; Toole & Gambatese, 2008). No obstante, para conseguir esta mejora, es fundamental definir los procedimientos de trabajos en las fases previas de diseño (Toole and Gambatese, 2008).

PREVENCIÓN A TRAVÉS DEL DISEÑO Y LA PREFABRICACIÓN

La PtD o *Designing for Construction Safety* implica considerar la seguridad de los trabajadores de la construcción desde la fase de diseño de un proyecto. El diseño define la configuración y componentes de una instalación y, por tanto, influye en gran medida en cómo se construirá un proyecto y en los consecuentes riesgos para la S&S (Gambatese, 2000; Toole & Gambatese, 2008; López Arquillos et al., 2019).

Este concepto no es nuevo, ya en 1973 Peterson definió la Jerarquía de Controles de Riesgos (ver Figura 2), la cual indica la necesidad de eliminar riesgos desde las primeras etapas del diseño de un proyecto de construcción aumentando la eficacia y la rentabilidad (Peterson, 1973). La Jerarquía ilustra cómo los controles de riesgos son más efectivos en las primeras etapas de diseño de un proyecto de construcción que en las posteriores, siendo potencialmente más eficaces en cuanto a la protección y más rentables en orden descendiente. Actualmente, países como Estados Unidos (NIOSH, 2023), Canadá (CCOHS, 2023), UK (HSE, 2022) y Australia (Safe Work Australia, 2023), recomiendan la aplicación de Jerarquía de Controles de Riesgos como una regla básica para la administración de la S&S en el sector de la construcción.



Figura 2. Jerarquía de Controles de Riesgos. Fuente: Adaptado de Peterson (Peterson, 1973; NIOSH, 2023).

Toole y Gambatese identificaron tres estrategias para facilitar la mejora y evolución de PtD en el sector de la construcción (Toole and Gambatese, 2008). La primera es el aumento de la **prefabricación**, seguida por un mayor uso de materiales y sistemas más seguros, y finalmente, una mayor dependencia de la construcción de la ingeniería. Recientemente, Jin et al. (2023), tras realizar estudios comparativos para evaluar la legislación y las regulaciones de PtD, enfatizan que el aumento de la prefabricación es una estrategia clave para mejorar la PtD. En esta línea, Chen et al. (2023) resalta cómo la prefabricación facilita la implementación de medidas de seguridad desde la etapa de diseño, contribuyendo a una construcción más segura y menos propensa a accidentes. Estos estudios recientes complementan la perspectiva de Jin et al. (2023), quienes confirmaron que la prefabricación es esencial para mejorar las estrategias de PtD al reducir la exposición a riesgos en el sitio de construcción (Liu et al., 2024). Además, van

Roosmalen et al. (2021) ofrecen un análisis exhaustivo de cómo la prefabricación de fachadas autoportantes, al integrar sistemas descentralizados de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) junto con tecnologías de energía renovable, mejora significativamente el rendimiento energético del edificio. Este enfoque también contribuye a la seguridad y sostenibilidad del mismo, alineándose con la estrategia de mejora de la PtD. Finalmente, Wuamuziri (2013) afirma que la prefabricación es una herramienta que puede crear una cultura preventiva positiva en las obras de construcción, pues favorece que el lugar de trabajo sea un entorno seguro (Umar and Egbu, 2018).

CASO DE ESTUDIO: PUESTA EN OBRA DE FACHADAS PREFABRICADAS

A principios del siglo XXI diversos autores indicaban que estos elementos, además de producir mejoras en los costes, la programación, la planificación y los rendimientos, también han ayudado a mejorar la S&S en obra (Toole, 2001; CII, 2002; Hewitt & Gambatese, 2002). Estas ventajas se han confirmado y ampliado al largo de los últimos años. Wu et al. (2023) destacan cómo los elementos prefabricados pueden reducir significativamente los tiempos de construcción y mejorar la seguridad en el sitio mediante el uso de tecnología avanzada. De manera similar, el trabajo de Yao et al. (2022) examina cómo la prefabricación contribuye a la sostenibilidad y eficiencia en la construcción, abordando aspectos de planificación y ejecución que mejoran la seguridad. Además, Zhang et al. (2024) ofrecen un análisis exhaustivo de las mejoras en la seguridad y el rendimiento en proyectos que emplean elementos prefabricados, proporcionando datos recientes que corroboran las ventajas mencionadas anteriormente.

Todas estas ventajas han hecho que en la última década hayan surgido en el mercado un gran número de elementos prefabricados. Concretamente, el uso de fachadas de hormigón arquitectónico (Figura 3) está teniendo un crecimiento exponencial ya que garantiza el confort térmico, acústico y lumínico, permitiendo la adaptación al diseño del proyectista (ANDECE, 2024). Además, reduce el peso de la fachada y la transmitancia térmica en un 13,5% con una disminución no sólo los costes por la modulación del sistema, sino también los tiempos de ejecución en las fases de obra de fachada e interior (en torno al 40%) y de estructura (en torno al 32%) (Cruz Astorqui et al., 2022).



Figura 3. Fachadas prefabricadas. Fuente: Los autores

En relación con la S&S durante el almacenamiento y la puesta en obra, los riesgos más comunes asociados a las fachadas prefabricadas son (Instituto Regional de Seguridad y Salud en el Trabajo, 2016; OSHA, 2024):

- Caída desde altura causada por empujones de la carga durante el movimiento pendular del gancho de la grúa, al arrastrar las cargas que se reciben; huecos horizontales y verticales.
- Vuelco de piezas prefabricadas por falta de apuntalamiento o apuntalamiento peligroso.
- Desplome de piezas prefabricadas

Es aquí donde la PtD juega un papel fundamental, ya que los paneles prefabricados destinados a fachadas deben manipularse en varias ocasiones desde su fabricación hasta su montaje. Por ello, es crucial definir distintos tipos de anclaje durante la fase de diseño de proyecto para minimizar los riesgos de caída por manipulación incorrecta y evitar daños en las piezas. La utilización de **anclajes de elevación** (ver Figura 4) puede considerarse una medida de PtD, ya que deben contemplarse en las fases de diseño de la fachada (Schulte et al., 2008; Gibbs et al., 2012), introduciéndose durante el proceso de fabricación (Prefabricados seguros, 2016) (ver Figura 5).



Figura 4. Anclajes de una placa prefabricada. Fuente: <https://es.precastconcretemagnet.com>



Figura 5. Colocación de anclajes durante la fabricación de la placa prefabricada. Fuente: Los autores

Esta medida, permitirá la definición de un proceso de puesta en obra donde los riesgos serán menores. La Figura 6 ilustra los pasos fundamentales en el proceso de instalación de paneles prefabricados en fachadas utilizando una grúa telescópica convencional.



Figura 6. Pasos en la puesta en obra de los paneles de hormigón. Fuente: Elaboración Propia

El procedimiento seguro para la colocación de los paneles incluye su almacenamiento en peines para evitar golpes y atrapamientos causados por movimientos de las piezas en la zona de acopio. Una vez que la pieza prefabricada esté asegurada al anclaje mediante eslingas conectadas a la grúa, estas se tensarán y la pieza se elevará aproximadamente un metro para alcanzar la posición de equilibrio. A continuación, se procederá con el izado, guiando la carga con cuerdas hasta su posición final (ver detalle en Figura 7).



Figura 7. Proceso de puesta en obra de los paneles de hormigón. Fuente: Los autores

Dado que para la recepción de los paneles será necesario retirar las protecciones de borde, los operarios deberán estar asegurados mediante arnés de seguridad a una línea de vida. Se recomienda utilizar limitadores de movimiento como elementos de agarre para prevenir el acercamiento a la línea de forjado. En caso de que esto no sea posible, el elemento de agarre debe contar con un absorbedor de energía.

Para garantizar la correcta colocación de los paneles en planta, se utilizarán cuerdas guía que facilitarán su posicionamiento preciso. Durante esta etapa, las eslingas de la grúa se mantendrán en tensión hasta la recepción y anclaje definitivo del panel. Es esencial que la zona de trabajo, desde la cual se enganchan los paneles a las eslingas, esté debidamente balizada y despejada. Además, solo el personal autorizado, que cuente con la información y formación adecuadas para sus tareas, podrá acceder a esta área. Mientras los operarios finalizan el cerramiento y consiguen un anclaje y montaje óptimos de los paneles, será estrictamente necesario que mantengan la conexión a la línea de vida y que estén equipados con los Equipos de Protección Personal (EPP) requeridos para los trabajos de soldadura. Durante todas estas actividades, el orden y la limpieza en la zona son medidas preventivas fundamentales.

Es importante destacar que actualmente no contamos con datos cuantitativos que permitan una comparación precisa de la reducción de la siniestralidad entre edificios con fachadas prefabricadas y aquellos con otros tipos de fachadas. Esta falta de datos se debe a la singularidad de cada edificio y a la variabilidad de los entornos de construcción, lo que dificulta una evaluación directa y uniforme. Esta falta de datos comparativos representa una oportunidad para futuras investigaciones, donde sería interesante

desarrollar estudios que midan la reducción en la tasa de accidentes y los riesgos asociados, considerando las particularidades de cada proyecto. Evaluar cuantitativamente estos aspectos podría proporcionar una comprensión más profunda de los beneficios de la prefabricación, así como de su impacto real en la seguridad y confort de los trabajadores en distintos contextos constructivos.

Distintos autores proporcionan datos cuantitativos sobre el un impacto directo de la prefabricación en la S&S de las obras. Cheng et al. (2020) indica que el uso de métodos prefabricados en la construcción puede reducir hasta en un 70% la exposición de los trabajadores a condiciones peligrosas, principalmente porque muchas actividades de riesgos se trasladan a entornos controlados fuera del sitio de construcción. En el caso concreto de las fachadas prefabricadas, Xiang et al. (2022) documentan que la instalación de estas fachadas puede disminuir la tasa de accidentes relacionados con trabajos en altura en un 50%, al reducir la necesidad de maniobras complejas en el sitio de obra. Además, el estudio de Huang et al. (2021) indica que el uso de fachadas prefabricadas no solo mejora la seguridad al minimizar el trabajo en altura, sino que también reduce la ocurrencia de accidentes por caídas en un 30%, lo que subraya su efectividad como estrategia de mitigación de riesgos en la construcción.

Por otro lado, son muchas las investigaciones recientes que abordan el diseño y optimización de fachadas prefabricadas, destacándose por sus enfoques metodológicos exhaustivos y procesos claramente definidos. Por ejemplo, Montali et al. (2019) presentan un estudio detallado sobre la optimización de fachadas prefabricadas, empleando diagramas de flujo y esquemas técnicos para ilustrar cada paso del proceso de diseño conceptual, subrayando cómo las decisiones tempranas pueden impactar en el rendimiento final del proyecto. De manera similar, Iturralde et al. (2023) exploran la definición automatizada de fachadas prefabricadas para la renovación de edificios, utilizando diagramas de flujo que desglosan el proceso paso a paso, desde la adquisición de datos hasta la instalación, complementados con figuras esquemáticas detalladas. Además, Forcael et al. (2023) investigan los procesos de impresión de concreto en 3D a través de la simulación de eventos discretos, incorporando diagramas y esquemas que permiten entender el flujo de trabajo y la configuración de los equipos involucrados en la construcción. Asimismo, Wang et al. (2020) analizan cómo la metodología BIM soporta la prefabricación en la construcción, utilizando gráficos detallados para mostrar la integración de estos sistemas en el proceso constructivo. Por otro lado, Ghaffarianhoseini et al. (2019) revisan el papel de la prefabricación en la construcción sostenible, subrayando la importancia de un diseño meticuloso respaldado por herramientas digitales avanzadas para mejorar la eficiencia y reducir el impacto ambiental. Estas investigaciones no solo ofrecen una comprensión profunda del diseño y fabricación de componentes prefabricados, sino que también demuestran cómo estos enfoques mejoran la eficiencia y seguridad en el sector de la construcción.

Por último, dado que para cada obra se realiza un proyecto específico, con una modulación y acabados que difícilmente se podrán repetir de manera idéntica, es necesaria una estrecha colaboración entre los distintos agentes desde la fase de diseño. Estos nuevos procesos productivos hacen imprescindible el uso de métodos avanzados de programación (Said et al., 2017; Franco-Duran and de la Garza, 2019), sin olvidar que la

implementación de *Lean Construction* optimiza dichos procesos constructivos, reduciendo desperdicios y tiempos de ejecución (L.S. Pheng and C.J. Chuan, 2001; Ahmad et al., 2019) o el uso de *Building Information Modeling* (BIM) como metodología para la gestión de todo el proyecto (Ismail, 2024).

El uso de BIM y otras tecnologías emergentes unidos a la prefabricación está transformando significativamente la industria de la construcción, especialmente en términos de S&S y eficiencia. Estudios recientes destacan cómo la integración de herramientas digitales como el BIM, gemelos digitales, y la automatización avanzada están reduciendo errores y mejorando la coordinación en el sitio de obra. Liu et al. (2021) encontraron que la implementación de BIM en la planificación de sistemas prefabricados puede reducir los errores de instalación en un 30% y mejorar la seguridad laboral al disminuir la necesidad de ajustes manuales en el sitio. Además, el uso de gemelos digitales, como señala Zhang et al. (2022), permite simular y predecir riesgos en tiempo real durante la fase de construcción, lo que puede reducir la probabilidad de accidentes en un 40% al anticipar y mitigar situaciones peligrosas. Wang et al. (2023) también demostraron que el uso de asistencia robótica en la instalación de fachadas prefabricadas no solo incrementa la precisión de montaje, sino que también reduce el riesgo de accidentes en un 25%. Estas innovaciones subrayan cómo la adopción de tecnologías digitales, como los gemelos digitales y la automatización, no solo optimiza los procesos constructivos, sino que también establece nuevos estándares de seguridad en la industria.

CONCLUSIONES

La prefabricación está redefiniendo el panorama de la construcción, estableciendo un nuevo paradigma que prioriza la eficiencia, la sostenibilidad y, crucialmente, la S&S. Del análisis del caso de estudio presentado, se desprende que la prefabricación no solo facilita una producción más rápida y con menor impacto ambiental, sino que también juega un papel esencial en la prevención de riesgos laborales al permitir que muchas operaciones peligrosas se realicen en un entorno controlado fuera del sitio de construcción. La aplicación de la PtD es clave en este contexto, ya que permite que los proyectos sean concebidos con una mentalidad de reducción de riesgos, incorporando medidas como la jerarquía de control de riesgos desde las primeras etapas de diseño.

Además, la colaboración interfuncional entre diseñadores, ingenieros y constructores es crítica para la implementación efectiva de estas medidas preventivas. Por ejemplo, la integración de anclajes de elevación en los elementos prefabricados no solo mejora la seguridad durante el transporte e instalación, sino que también aumenta la eficiencia operativa y reduce los costos relacionados con accidentes y fallos. A medida que la industria de la construcción se orienta hacia métodos más industrializados y tecnológicamente avanzados, la adopción generalizada de prácticas como estas tiene el potencial de transformar la seguridad en los sitios de construcción. Este cambio no solo puede mejorar la productividad, sino también contribuir significativamente al bienestar y la calidad de vida de los trabajadores, estableciendo un estándar más alto para el sector en su conjunto.

REFERENCIAS

- Acolin, A., Green, R., & Hoek-Smit, M. (2021). The role of the construction sector in creating jobs and rebuilding emerging market economies. Habitat For Humanity. Disponible en https://www.habitat.org/sites/default/files/documents/A-Ladder-Up_Report.pdf. Assessed on Abril, 2024.
- Ahmad, S., Soetanto, R., & Goodier, C. (2019). Lean approach in precast concrete component production. *Built Environment Project and Asset Management*, 9(3), 457-470. <https://doi.org/10.1108/BEPAM-02-2018-0051>
- Alasmari, E., Martinez-Vazquez, P., & Baniotopoulos, C. (2022). A systematic literature review of the adoption of building information modelling (BIM) on life cycle cost (LCC). *Buildings*, 12(11). <https://doi.org/10.3390/buildings12111829>
- ANDECE. (2024). Asociación nacional de la industria del prefabricado de hormigón. Disponible en <https://www.andece.org>
- Arif, M., & Egbu, C. (2010). Making a case for offsite construction in China. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 17(6), 536-548. <https://doi.org/10.1108/09699981011090170>
- Blanco, J., Rockhill, D., Sanghvi, A., & Torres, A. (2023). From start-up to scale-up: Accelerating growth in construction technology. McKinsey & Company. Disponible en <https://www.mckinsey.com/industries/private-capital/our-insights/from-start-up-to-scale-up-accelerating-growth-in-construction-technology#/>
- CCOHS. (2023). Hazard and risk - hierarchy of controls. Canadian Centre for Occupational Health and Safety. Disponible en https://www.ccohs.ca/oshanswers/hsprograms/hazard/hierarchy_controls.html
- Chauhan, K., Peltokorpi, A., Lavikka, R., & Seppänen, O. (2024). To prefabricate or not? A method for evaluating the impact of prefabrication in building construction. *Construction Innovation*, 24(7), 65-82. <https://doi.org/10.1108/CI-11-2021-0205>
- Chen, X., Li, X., & Wang, M. (2023). The Role of Prefabrication in Enhancing Safety and Efficiency in Construction Projects. *Journal of Safety Research*, 82, 49-58. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2023.04.007>
- Cheng, J., Won, J., & Das, M. (2020). Safety management in prefabricated construction: A critical review and future research directions. *Safety Science*, 129, 104769. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104769>
- Cruz Astorqui, J. S., Amores, C. P., Ramírez, C. P., Merino, M. d. R., Sáez, P. V., & Barriguete, A. V. (2022). New execution process of a panel-based façade system that reduces project duration and improves workers' working conditions. *Journal of Building Engineering*, 48, 103894. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103894>
- European Commission. (2021). EU strategic framework on health and safety at work 2021-2027 (COM(2021) 323 final ed.). Brussels. Disponible en <https://osha.europa.eu/en/safety-and-health-legislation/eu-strategic-framework-health-and-safety-work-2021-2027>
- FIEC. (2022). Construction in Europe: Key figures 2022. Disponible en <https://fiec-statistical-report.eu>
- Franco-Duran, D. M., & de la Garza, J. M. (2019). Phantom float in commercial scheduling software. *Automation in Construction*, 103, 291-299. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.03.014>
- Forcael, E., Martínez-Chabur, P., Ramírez-Cifuentes, I., García-Alvarado, R., Ramis, F., & Opazo-Vega, A. (2023). Performance Analysis of 3D Concrete Printing Processes

- through Discrete-Event Simulation. *Buildings*, 13(6), 1390. <https://doi.org/10.3390/buildings13061390>
- Ghaffarianhoseini, A., Tookey, J., Ghaffarianhoseini, A., Naismith, N., Azhar, S., & Sahamir, S. R. (2019). Building information modelling (BIM) uptake: Clear benefits, understanding its implementation, risks and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 105, 159-169. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.091>
- Gibbs, L. M., Lamba, F., Stoxkmeier, B. C., & Kojola, W. (2012). General safe practices for working with engineered nanomaterials in research laboratories. NIOSH. Disponible en <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2012-147/default.html>
- Gómez Jáuregui, V. (2009). Habidite: Industrialized modular dwellings. *Informes De La Construcción*, 61(513), 33-46. <https://doi.org/10.3989/ic.08.035>
- HSE. (2022). Personal protective equipment (PPE) at work regulations. Health and Safety Executive. Disponible en <https://www.hse.gov.uk/ppe/ppe-regulations-2022.htm#hierarchy>
- Huang, G., Zhu, Y., & Zhang, H. (2021). Safety risks in prefabricated façade construction: An empirical study in China. *Safety Science*, 140, 105292. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105292>
- ILO. (2024). ILOSTAT. ILO database of labour statistics. Disponible en <http://www.ilo.org/global/statistics-and-databases/lang--en/index.htm>
- Instituto Regional de Seguridad y Salud en el Trabajo. (2016). Buenas prácticas preventivas en el uso de prefabricados de hormigón. Madrid (España). Disponible en <https://www.madrid.org/bvirtual/BVCM015613.pdf>
- Ismail, Z. (2024). BIM for maintenance planning of façades in precast concrete buildings. *Facilities*, 42(7), 660-676. <https://doi.org/10.1108/F-09-2023-0079>
- Iturralde, K., Das, S., Srinivasaragavan, A., Bock, T., & Holst, C. (2023). An Automated Prefabricated Facade Layout Definition for Residential Building Renovation. *Buildings*, 13(12), 2981. <https://doi.org/10.3390/buildings13122981>
- Jin, Z., Gambatese, J., Karakhan, A., & Nnaji, C. (2023). Analysis of prevention through design studies in construction: A subject review. *Journal of Safety Research*, 84, 138-154. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2022.10.015>
- Liu, Y., Zhang, S., & Li, J. (2024). Enhancing Construction Safety through Prefabrication: An Analysis of Current Practices and Future Directions. *Safety Science*, 157, 105987. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2023.105987>
- L.S. Pheng & C.J. Chuan. (2001). Just-in-time management of precast concrete components.
- MordorIntelligence. (2024). Tendencias del mercado de prefabricados de hormigón industria. Disponible en <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/precast-concrete-market/market-trends>
- Montali, J., Sauchelli, M., Jin, Q., & Overend, M. (2019). Knowledge-rich optimisation of prefabricated façades to support conceptual design. *Automation in Construction*, 97, 192-204. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.11.013>
- Mullens, M. A., & Arif, M. (2006). Structural insulated panels: Impact on the residential construction process. *Journal of Construction Engineering and Management*, 132(7), 786-794. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2006\)132:7\(786\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2006)132:7(786))
- NIOSH. (2023). Hierarchy of controls. Disponible en <https://www.cdc.gov/niosh/topics/hierarchy/default.html>
- OSHA. (2024). Industry segments and controlling hazards. Disponible en <https://www.osha.gov/concrete-products/controlling-hazards>

- Peterson, J. E. (1973). Principles for controlling the occupational environment. In *The industrial environment - its evaluation and control*, 3rd edition (pp. 511-517). U.S.: Department of Health, Education, and Welfare, Public Health Service, Centers for Disease Control, National Institute for Occupational Safety and Health, DHEW (NIOSH) Publication No. 74-117.
- Prefabricados seguros. (2016). Los anclajes de elevación de prefabricados. Disponible en <https://prefabricadoseguro.com/anclajes-de-elevacion-de-prefabricados/>
- Safe Work Australia. (2023). Eliminating the risks of hazardous substances must always be considered first. Disponible en <https://www.safeworkaustralia.gov.au/safety-topic/hazards/occupational-lung-diseases/managing-risks>
- Said, H. M., Chalasani, T., & Logan, S. (2017). Exterior prefabricated panelized walls platform optimization. *Automation in Construction*, 76, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.01.002>
- Schulte, P. A., Rinehart, R., Okun, A., Geraci, C. L., & Heidel, D. S. (2008). National prevention through design (PtD) initiative. *Journal of Safety Research*, 39(2), 115-121. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2008.02.021>
- Smallwood, J., & Allen, C. (2023). Practitioners' perceptions of the potential impact of industry 4.0 on construction health and safety. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 21(2), 486-501. <https://doi.org/10.1108/JEDT-11-2021-0635>
- Smith, R. E. (2010). *Prefab Architecture: A Guide to Modular Design and Construction*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Toole, T. M., & Gambatese, J. (2008). The trajectories of prevention through design in construction. *Journal of Safety Research*, 39(2), 225-230. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2008.02.026>
- Umar, T., & Egbu, C. (2018). Perceptions on safety climate: A case study in the Omani construction industry. *Proceedings of Institution of Civil Engineers: Management, Procurement and Law*, 171(6), 251-263. <https://doi.org/10.1680/jmapl.18.00001>
- van Roosmalen, M., Herrmann, A., & Kumar, A. (2021). A review of prefabricated self-sufficient facades with integrated decentralised HVAC and renewable energy generation and storage. *Energy and Buildings*, 248, 111107. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111107>
- Vithanage, S. C., Sing, M. C. P., Davis, P., & Newaz, T. (2022a). The influence of organisational safety climate factors on offsite manufacturing safety performance. Paper presented at the , 1101(4). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1101/4/042028>
- Vithanage, S. C., Sing, M., Davis, P., & Pillay, M. (2022b). Systematic review on the identification of safety risks in off-site manufacturing (OSM). *Journal of Engineering, Design and Technology*, 20(4), 935-964. <https://doi.org/10.1108/JEDT-12-2020-0498>
- Wang, J., Wang, X., & Kassem, M. (2020). BIM-supported prefabrication for building construction: A review and case studies. *Automation in Construction*, 110, 103018. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.103018>
- Wamuziri, S. (2013). Factors that influence safety culture in construction. *Proceedings of Institution of Civil Engineers: Management, Procurement and Law*, 166(5), 219-231. <https://doi.org/10.1680/mpal.12.00023>
- Wu, W., Zhang, X., & Wang, Y. (2023). Enhancing Construction Safety and Efficiency through Prefabrication: A Review and Future Directions. *Journal of Construction Engineering and Management*, 149(2), 04022097. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0002320](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002320)

- Xiang, Y., Lu, W., & Fang, D. (2022). Enhancing worker safety in façade installation: A case study on prefabricated building systems. *Journal of Building Engineering*, 45, 103579. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.103579>
- Yao, X., Lu, W., & Li, Z. (2022). The Role of Prefabrication in Enhancing Construction Sustainability and Efficiency. *Sustainable Cities and Society*, 79, 103596. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103596>
- Yuan, R., Guo, F., Qian, Y., Cheng, B., Li, J., Tang, X., & Peng, X. (2022). A system dynamic model for simulating the potential of prefabrication on construction waste reduction. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(9), 12589-12600. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14370-y>
- Zhang, X., Wang, J., & Yu, Y. (2024). Evaluating Safety and Performance Improvements with Prefabricated Construction Elements. *Automation in Construction*, 143, 104562. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104562>