

Díaz, H.E., García, S., Davis, M. & Orihuela, P. (2024). Enseñanza activa: comparativa entre metodologías tradicionales y Lean Construction mediante un juego de armado de casas de madera. En Herrera, R.F., Salazar, L.A., (Editores), *Actas de congreso del IX Congreso Iberoamericano de Gestión y Tecnología de la Construcción (IX ELAGEC2024)*.

COMPARATIVA ENTRE METODOLOGÍAS TRADICIONALES Y LEAN CONSTRUCTION MEDIANTE UN JUEGO DE ARMADO DE CASAS DE MADERA

Héctor E. Díaz ¹ – hectordiaz@tec.mx

Salvador García ² – sgr@tec.mx

Miguel Davis ³ – migueldavis@tec.mx

Pablo Orihuela ⁴ – porihuela@motiva.com.pe

¹Departamento de Tecnologías Sostenibles y Civil, Tecnológico de Monterrey, Monterrey, México.

² Departamento de Tecnologías Sostenibles y Civil, Tecnológico de Monterrey, Monterrey, México.

³ Departamento de Tecnologías Sostenibles y Civil, Tecnológico de Monterrey, Monterrey, México.

⁴Departamento de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Católica de Perú, Lima, Perú.

RESUMEN

Lean Construction se ha consolidado como una filosofía crucial para la ingeniería civil en las últimas dos décadas, aportando numerosos beneficios en diversas etapas de los proyectos. Sin embargo, su enseñanza en el aula a menudo se limita a conceptos teóricos, lo que dificulta a los estudiantes aplicar sus principios de manera práctica y obtener resultados de forma inmediata. Para abordar esta limitación, se implementó un enfoque de aprendizaje activo, utilizando un juego de armado de casas de madera en serie como herramienta didáctica, permitiendo a los estudiantes experimentar, a lo largo de cuatro rondas, las ventajas de la filosofía Lean, así como obtener resultados de manera inmediata dentro del aula mediante una hoja de Excel Automatizada. Los resultados fueron contundentes: el tiempo de armado se redujo en un 79.83% para el prototipo A y en un 56.26% para el prototipo B. Asimismo, el tiempo improductivo (desperdicio) disminuyó en un 75% y un 67.80% para los prototipos A y B, respectivamente. Estas reducciones reflejan una mayor eficiencia en la ejecución, lograda mediante la eliminación de actividades que no agregan valor y la continuidad del flujo de trabajo. Finalmente, en futuros trabajos se pretende documentar el aprendizaje obtenido por los estudiantes.

PALABRAS CLAVE

Lean Construction; Juegos de Lean Construction; Armado de Casas; Aprendizaje Activo; Productividad

INTRODUCCIÓN

Lean Construction es una filosofía que ha tenido un impacto significativo en la industria de la construcción durante las últimas dos décadas. Esta metodología, originada en la industria manufacturera y desarrollada por Toyota, ha sido adoptada en diversos sectores a nivel global, siendo la construcción uno de ellos. Sin embargo, dada la naturaleza particular de este sector, su implementación presenta diferencias importantes en comparación con la manufactura.

En cuanto a su enseñanza, se han identificado algunas limitaciones (Gómez Cabrera & Sánchez Rivera, 2023), ya que tradicionalmente se ha enseñado a través de conceptos teóricos, complementados con la presentación de resultados obtenidos mediante la implementación de sus principios y herramientas en diferentes proyectos de construcción. Sin embargo, este enfoque no siempre permite que los resultados se perciban de manera tangible e inmediata, lo que puede afectar la valoración de los beneficios asociados a la adopción de esta filosofía.

Con base en lo anterior, nosotros, los catedráticos, hemos considerado una solución para que los estudiantes aprendan mediante la práctica, en concordancia con la pirámide del conocimiento, la cual establece que los estudiantes retienen hasta el 75% de información haciendo (Masters, 2020) . Este enfoque es además un componente clave del modelo TEC21 del Tecnológico de Monterrey, que promueve el aprendizaje basado en retos. Según este modelo, los estudiantes adquieren un conocimiento más profundo cuando participan en experiencias activas de aprendizaje, enfrentándose a problemas o casos, descubriendo soluciones por sí mismos e interactuando con otros estudiantes (ITESM, 2024).

En respuesta a esta necesidad, los autores diseñamos un juego didáctico que consiste en el armado de casas de madera MDF a escala. Este juego incluye una hoja de cálculo automatizada en Excel que permite generar resultados de manera oportuna en el aula, proporcionando retroalimentación inmediata sobre los resultados alcanzados. El objetivo de este trabajo es que los estudiantes puedan descubrir, de manera práctica y rápida dentro del aula, las ventajas de la filosofía Lean en el ámbito de la construcción de viviendas en serie a través del juego diseñado.

Este artículo presenta la metodología de investigación, los resultados obtenidos con la implementación del juego y se encuentra estructurado de la siguiente manera: primero, se presentan los antecedentes mediante una revisión de la literatura existente; luego, se describen los materiales y métodos de investigación utilizados; a continuación, se exponen los resultados obtenidos tras la realización de cuatro rondas con dos equipos en el aula; y, finalmente, se presentan las conclusiones del trabajo.

ANTECEDENTES

En la literatura de Lean, se ha destacado el buen manejo del aprendizaje lúdico y activo, incluyendo juegos y simulaciones de Lean Construction. Estos recursos, diseñados por diversos autores en distintos países, tienen como objetivo principal situar al estudiante como protagonista y están enfocados en la enseñanza de los principios y prácticas de Lean Construction.

Por ejemplo, se tiene el juego LeapCon 1.0™ creado por el Dr. Rafael Sacks para simular la construcción de departamentos de un edificio de ocho niveles con cuatro departamentos por nivel. Se diseñó para medir los impactos de los desperdicios provocados por el proceso de construcción. Con este juego se miden los tiempos de ciclo, los departamentos terminados, departamentos defectuosos, entre otros indicadores (Sacks & Goldin, 2007).

The Lean Lego Game creado por Danilo Sato es otro juego que utiliza bloques de Lego™ para simular un proceso de construcción. En él, los participantes deben identificar y eliminar desperdicios asociados con el proceso constructivo (Sato & Trindade 2009).

The Villego® Simulation se trata de una simulación para enseñar Last Planner (Gonzalez et al., 2014; Warcup & Reeve, 2014) en la que los participantes construyen una estructura utilizando bloques de construcción, siguiendo principios Lean para mejorar el proceso con cada iteración. Este juego, abarca conceptos como la mejora continua, la identificación y eliminación de desperdicios, y la colaboración en equipo.

Por otra parte, Jacobsen et al. (2021) propusieron una plataforma digital para que los participantes aprendan el concepto de lean Construction mediante la realidad virtual. Esta plataforma involucra varios participantes a la vez. Con el juego se aprenden los principios lean para eliminar desperdicios, fomentar la colaboración y optimizar la calidad.

Asimismo, Lucko & Senior (2022) han trabajado con la virtualización de los juegos clásicos y sus características de implementación, metodologías para implementarse en un entorno computacional instruccional.

Bhatnagar et al. (2023) realizaron una revisión sistemática de los juegos y simuladores de Lean y mencionan que la popularidad de estos juegos ha incrementado considerablemente en los últimos años. Los autores dicen que ya mayoría de las contribuciones han sido en Estados Unidos.

Adicionalmente, Juan Felipe Pons menciona que uno de los desafíos de los educadores es trasladar la enseñanza al sector de la industria de la construcción. Al autor describe las dos dinámicas educativas creadas para el sector de la construcción. Menciona que son las personas y no el producto, quienes se mueven a lo largo de la línea de producción (Pons, 2018)

En otro contexto, Gómez Cabrera & Sánchez Rivera (2023) muestran la implementación de varios juegos de Lean en el aula para medir su eficacia, pues creen que estos juegos tienen un gran potencial para mejorar los procesos educativos en la construcción.

En México, sin embargo, existen pocos antecedentes en el uso de juegos prácticos relacionados con Lean Construction que faciliten a los estudiantes universitarios y a otros participantes la implementación sencilla de prototipos, la aplicación de la filosofía y los principios de Lean Construction, así como la obtención automática de resultados inmediatos sin necesidad de realizar cálculos posteriores.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para cumplir con el objetivo de la investigación, los autores diseñaron una metodología específica. En esta sección se describen en detalle tanto los materiales utilizados en el desarrollo integral del proyecto, como el enfoque metodológico seguido para obtener los resultados deseados y alcanzar el objetivo propuesto.

3.1 Materiales

Para facilitar la ejecución de la investigación, se enumerarán todos los recursos necesarios para este proyecto, ya que cada uno desempeñó un papel crucial. Estos recursos se clasifican según las categorías presentadas en la Tabla 1.

Tabla 1. Recursos utilizados en esta investigación

Categoría	Recurso	Uso
Equipo	Computadoras	Uso del software de diseño de los prototipos Exposición del profesor Registro de tiempos por parte de estudiantes
	Máquina de corte láser	Corte de las piezas en MDF de cada prototipo
	Proyector	Proyección de las presentaciones de capacitación al estudiante
	Teléfonos celulares	Toma de fotografías y video del proceso de armado
Software y archivos	Autodesk Revit®	Diseño de los prototipos de viviendas A y B
	Microsoft Excel®	Uso de hojas de cálculo programadas
	Microsoft PowerPoint®	Organizador gráfico para visualización de las presentaciones e instructivo de armado
	Hoja de cálculo	Medición de tiempos de cada proceso y cálculo de resultados
	Instructivo de la actividad	Capacitación al estudiante sobre la actividad completa
	Instructivo armado	Capacitación al estudiante específicamente en el armado de cada prototipo de vivienda
Material de armado	Cinta adhesiva	Prefabricación uniendo varias piezas en una sola con cinta
	Prototipos de MDF	Armado de viviendas tipo A y B
	Cajas de cartón	Empaque material de armado de ambos prototipos, etc.

En la Tabla 1 se detallan los recursos clasificados en tres categorías: equipos, software y archivos, junto con el material necesario para la construcción de viviendas. El Tecnológico de Monterrey contaba previamente con algunos de estos recursos, mientras que otros fueron adquiridos de manera independiente.

En cuanto a los equipos, se emplearon computadoras para la presentación de la metodología a los estudiantes, así como para el uso del software y archivos de hojas de cálculo programadas, los cuales fueron utilizados para medir los tiempos de cada proceso. Además, se llevó a cabo el corte láser de veinte prototipos utilizando una máquina

disponible en el Tecnológico de Monterrey. Durante la práctica, también se utilizaron teléfonos celulares para capturar fotografías y videos del proceso de armado.

En cuanto al software, se emplearon diversas aplicaciones como PowerPoint para diseñar los manuales de armado y presentaciones, Excel para la medición de tiempos y la obtención de resultados gráficos, así como Revit para la creación digital de los prototipos.

Por último, en cuanto al material de armado, se utilizó cinta adhesiva, las piezas de los prototipos A y B, así como empaques de cartón para cada vivienda.

3.2 Métodos

Para realizar esta investigación, se diseñó una metodología compuesta por cinco actividades principales, fundamentada en el Enfoque Cuantitativo a través del Estudio de Caso. Durante su desarrollo, se aplicaron cuatro métodos de investigación, tal como se muestra en la Figura 1.



Figura 1. Metodología diseñada para esta investigación

En la figura 1 se muestra la metodología seguida, la cual se divide en los pasos del 1 al 5 que se explican a continuación:

3.2.1 Diseño y fabricación de prototipos.

En esta etapa, el prototipado fue utilizado como método de investigación por derecho propio, permitiendo la prueba y refinamiento de ideas relacionadas con el diseño y la construcción de las viviendas. Se desarrollaron dos prototipos distintos de viviendas: el tipo A, con una losa plana, y el tipo B, con una losa inclinada a dos aguas.

En cuanto al diseño, se concibieron viviendas de dimensiones reducidas, aproximadamente de 15x15cm, que pudieran ser manipuladas fácilmente por una persona. Para ello, se empleó el software Autodesk® Revit®, que facilitó la creación de cada componente como una entidad individual, permitiendo su ensamblaje digital en un

modelo tridimensional BIM y la detección y corrección de posibles errores antes de su fabricación.

Posteriormente, ambos prototipos fueron materializados en madera MDF de 3mm de espesor, con todas sus piezas cortadas mediante una máquina láser, las cuales encajaron en un área de MDF de 60x60cm.

La vivienda tipo A, de losa plana, consta de 15 piezas que representan su estructura principal: cimentación, firme, muros de carga, losa y pretils como se muestra en la figura 2.

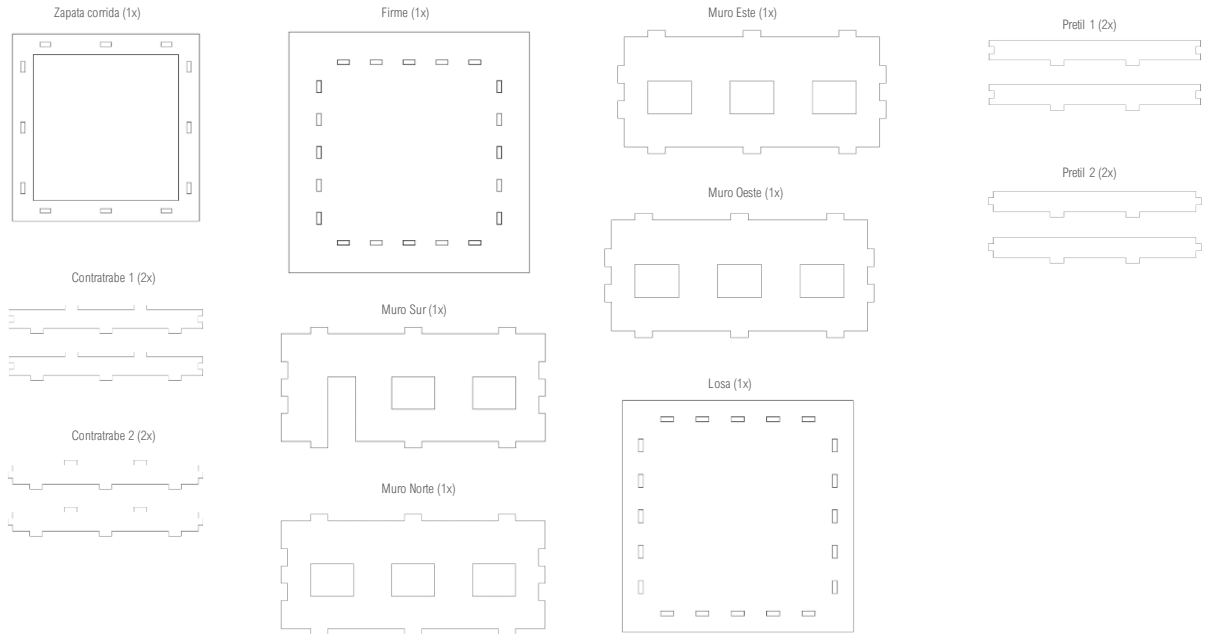


Figura 2. Piezas y materiales de la vivienda tipo A

Al combinar las piezas mencionadas anteriormente, se completa el prototipo de la vivienda tipo A. Una vez ensamblado, el resultado se asemeja a lo mostrado en la Figura 3, donde se aprecia una losa plana con pretils en los cuatro lados.

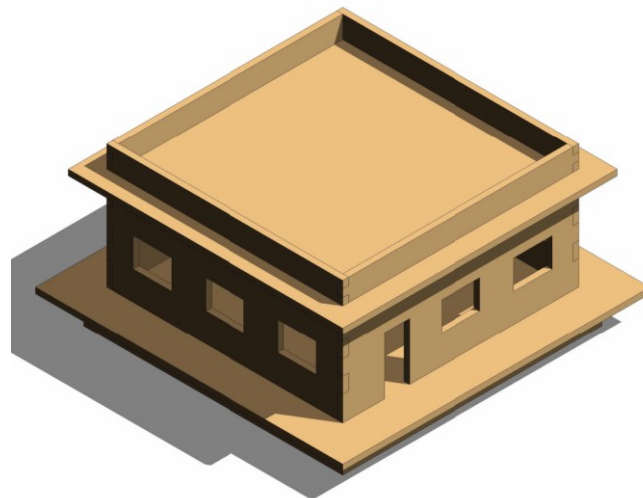


Figura 3. Prototipo ensamblado de Vivienda tipo A

A diferencia de la vivienda tipo A, la vivienda tipo B, de losa inclinada, consta de 12 piezas que representan su estructura principal: cimentación, firme, muros de carga y losas inclinadas como se muestra en la figura 4. Esta vivienda no lleva pretiles, pero dos de sus muros son inclinados y sostienen el techo inclinado a dos aguas. El techo fue subdividido en dos componentes para fácil almacenaje dentro de una caja de cartón pequeña.

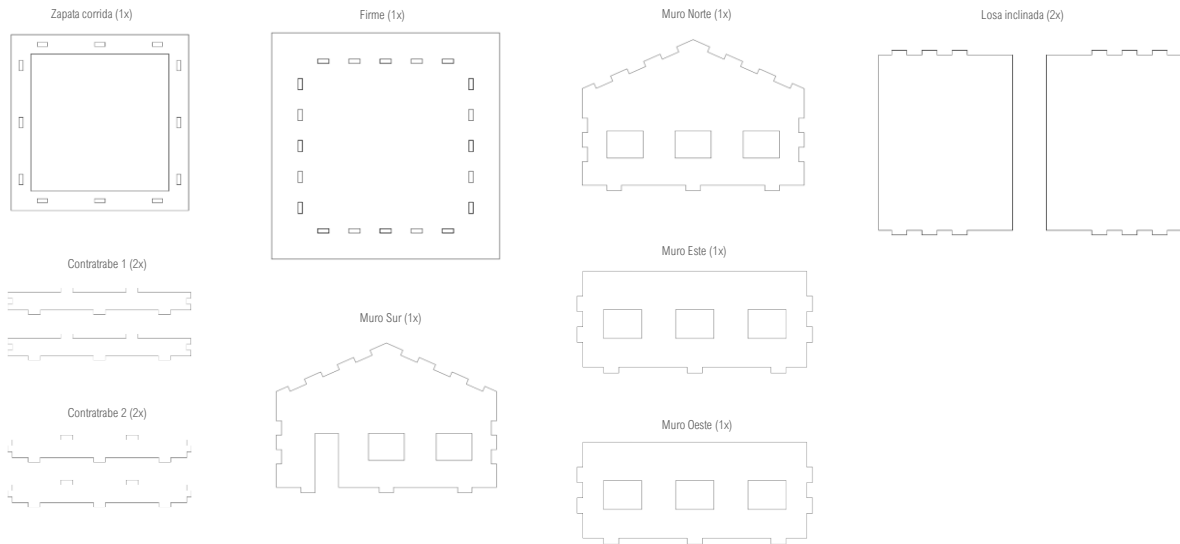


Figura 4. Piezas y materiales de la vivienda tipo B

La combinación de las 12 piezas mencionadas anteriormente conforma el prototipo de la vivienda tipo B. Una vez ensamblado, el resultado se asemeja a lo ilustrado en la Figura 5, donde se observa una losa inclinada con voladizos.

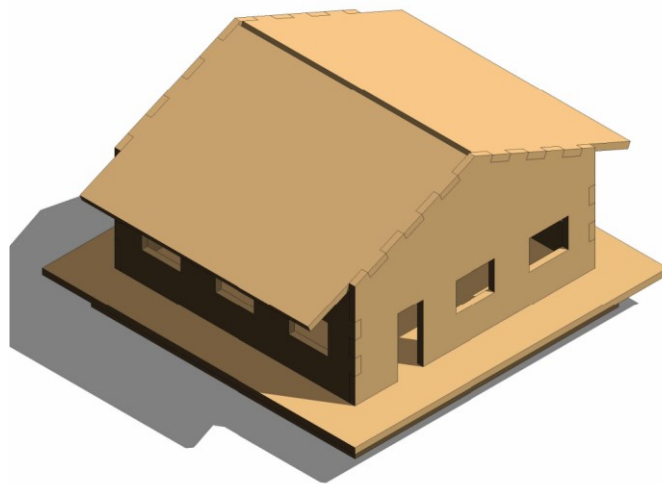


Figura 5. Prototipo ensamblado de Vivienda tipo B

3.2.2 Diseño de la actividad en el aula

En esta actividad, se utilizó el método de investigación conocido como diseño de casos, comúnmente empleado en el ámbito educativo, para analizar en detalle un conjunto

específico de situaciones y comprender un fenómeno particular con todos sus matices. Dado que el proceso de construcción implica una serie de elementos complejos, se decidió recurrir a este enfoque metodológico.

Para llevar a cabo esta investigación, se representó la secuencia de construcción de cuatro viviendas en serie utilizando modelos de madera. El objetivo principal fue que los estudiantes o participantes identificaran los problemas que ralentizan (pérdidas) el proceso tradicional de construcción y, posteriormente, propusieran mejoras aplicando los principios y la filosofía de Lean Construction.

En este contexto, se crearon cuatro casos específicos: el primero, que consistió en la construcción de cuatro viviendas de tipo A utilizando un proceso tradicional; el segundo, que implicó la construcción de cuatro viviendas de tipo B con un proceso tradicional; el tercero, donde se construyeron cuatro viviendas de tipo A utilizando el enfoque lean; y, finalmente, el cuarto caso, que involucró la construcción de cuatro viviendas de tipo B utilizando el proceso lean.

En cada uno de estos casos, la secuencia constructiva se diseñó para realizarse en equipos de seis personas que se explica a continuación.

3.2.2.1 Caso 1. Simulación del proceso tradicional vivienda tipo A

El armado del prototipo A en forma tradicional se debe realizar cuatro veces, ya que se busca representar la construcción de viviendas en serie idénticas.

Para simular el proceso tradicional de construcción de la vivienda tipo A, el equipo se organiza de la siguiente manera:

Tabla 2. Roles y funciones del equipo de armado de la vivienda tipo A

Rol	Funciones
Constructor 1	Cimentación
Constructor 2	Trabes de liga
Constructor 3	Firme y muros
Constructor 4	Losa y pretil
Tomador de tiempos	Registro de inicio y fin de cada proceso
Observador	Observación de incidentes en el proceso y documentación de evidencia

En relación con el proceso de ensamble, este consta de las siguientes actividades (figura 6):



Figura 6. Proceso de ensamble vivienda tipo A

El proceso anterior está vinculado con los componentes del prototipo A y requiere la participación de cuatro constructores para su ensamblaje. Además, se necesita un tomador de tiempos que registre el inicio y el final de cada una de las actividades de acuerdo con la Figura 6, utilizando un archivo de Excel®. Este proceso de armado debe repetirse cuatro veces, ya que implica la construcción de cuatro viviendas en serie.

Por otro lado, durante el armado con el proceso tradicional, se deben tener en cuenta los siguientes puntos:

- Los constructores están especializados en un proceso asignado y no realizan otros.
- Cada constructor trabaja de manera individual y no puede brindar ayuda a sus compañeros en otros procesos.
- Cada constructor debe esperar a que su compañero del proceso anterior finalice su actividad al cien por ciento antes de comenzar la suya.
- No se puede iniciar el armado de una vivienda nueva hasta que se haya completado el armado de la vivienda actual.
- El observador debe registrar cualquier tipo de incidencia o cuello de botella en el proceso.

Las incidencias, cuellos de botella o pérdidas podrían estar entre las siguientes (tabla 3):

Tabla 3. Tipos de pérdidas en armado de viviendas

Tipos de Pérdidas
Cuellos de botella
Personal en tiempo muerto
Retrabajos
Retraso por entrega de material
Mala supervisión
Obstrucciones entre cuadrillas
Daño a procesos previos
Etc..

3.2.2.2 Caso 2. Simulación del proceso tradicional vivienda tipo B

Al igual que en el prototipo A, el armado del prototipo B en forma tradicional se debe simular cuatro veces, ya que se busca representar la construcción de viviendas en serie idénticas con techos inclinados.

En este caso, el equipo se organiza de la siguiente manera:

Tabla 4. Roles y funciones del equipo de armado de la vivienda tipo B

Rol	Funciones
Constructor 1	Cimentación
Constructor 2	Trabes de liga
Constructor 3	Firme y muros

Constructor 4	Losas inclinadas
Tomador de tiempos	Registro de inicio y fin de cada proceso
Observador	Observación de incidentes en el proceso y documentación de evidencia

El proceso de ensamble de la vivienda B consta de las siguientes actividades (figura 7):

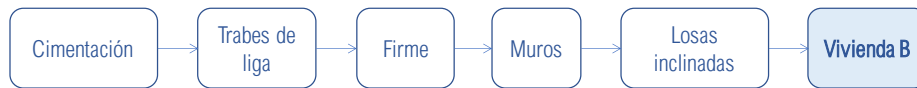


Figura 7. Proceso de ensamble vivienda tipo B

Las consideraciones y tipos de pérdidas aplicables al armado del prototipo B en el proceso tradicional son idénticas a las del prototipo A.

3.2.2.3 Caso 3. Simulación del proceso con enfoque Lean para vivienda tipo A

Este caso se lleva a cabo después de haber finalizado con las rondas del proceso tradicional. El propósito es que los estudiantes puedan apreciar las diferencias y ventajas que tiene el enfoque Lean.

Para la vivienda tipo A, el proceso de armado es exactamente igual que para la vivienda A correspondiente al del proceso tradicional, el cual va desde el cimiento hasta los pretilos en azotea.

En consecuencia, el equipo de armado de este prototipo con el enfoque Lean, es el mismo que el del proceso tradicional y se mantienen los mismos roles.

Sin embargo, en las rondas Lean, el equipo debe proponer tres mejoras o cambios concretos al proceso para optimizarlo.

Sin limitarse a ellas, se pueden sugerir las siguientes mejoras al proceso (Tabla 5).

Tabla 5. Posibles mejoras al proceso usando principios de Lean Construction

Mejoras al proceso	Observaciones
Personas multifuncionales	Ayudaría a mejorarlo debido a que una misma persona puede ser capaz de desarrollar varias actividades sin depender de otra persona que puede ocasionar cuellos de botella
Trabajo en equipo	Beneficiaría en varios aspectos: si un proceso tiene problemas, la persona que lo realiza puede ser ayudada; se reduciría el tiempo del proceso; los miembros del equipo pueden aportar otras soluciones.
Reducción del número de pasos o partes (prefabricación o preensamblado)	Con la prefabricación o la reducción del número de pasos o partes (piezas a ensamblar) se simplificaría el proceso y se reduciría su tiempo
5's	Beneficiaría en tiempo del proceso, por ejemplo:

Limpieza del área de trabajo y de las piezas: existiría claridad para identificar las piezas, manipularlas y ensamblarlas.
Clasificación: ayudaría a identificar y encontrar las piezas del mismo tipo más rápidamente
Orden: facilitaría la toma y manipulación de la pieza para ser ensamblada, con su sentido correcto y eliminaría las maniobras con ella.

3.2.2.4 Caso 4. Simulación del proceso con enfoque Lean para vivienda tipo B

Este caso se realiza una vez concluidas las rondas del proceso tradicional. El objetivo es que los estudiantes puedan apreciar las diferencias y ventajas del enfoque Lean.

Para la vivienda tipo B, el proceso de armado es exactamente igual al del proceso tradicional, abarcando desde los cimientos hasta la losa inclinada. Además, el equipo de armado de este prototipo con el enfoque Lean es el mismo que el del proceso tradicional, manteniendo los mismos roles.

Al igual que en el Caso 3, el equipo debe aplicar tres mejoras puntuales para mejorar su eficiencia. Se puede basar en la tabla 5.

3.2.3 Formación de equipos y capacitación.

En la formación de equipos, es crucial realizar una capacitación inicial sobre el armado de cada prototipo y los detalles del juego en sí. Esta capacitación permite al estudiante o jugador familiarizarse con las piezas y partes de cada prototipo, así como con el ensamblaje de cada uno de los procesos constructivos. De esta manera, se evitan sesgos relacionados con la curva de aprendizaje del armado.

Durante la actividad, se formaron 3 equipos de 6 integrantes cada uno, de acuerdo con las reglas del juego establecidas en el paso 3.2.2.

De manera individual, también cada estudiante armó ambos prototipos de vivienda en MDF (Figura 8.)



Figura 8. Capacitación inicial sobre armado de prototipos A y B de vivienda

3.2.4. Implementación de rondas de armado, juego o simulación

Esta actividad utilizó el juego o simulación como método de investigación, centrándose en los procesos de construcción de viviendas tipo A y B. Se implementaron cuatro rondas de armado, detalladas en los puntos 3.2.2.1 al 3.2.2.4, en las cuales se construyeron en serie cuatro viviendas del mismo tipo en cada ronda.

Primero, se realizaron las cuatro rondas explicadas en la metodología (Figura 9)

- Prototipo A con proceso tradicional
- Prototipo B con proceso tradicional
- Prototipo A con proceso Lean
- Prototipo B con proceso Lean



Figura 9. Armado de viviendas

Durante estas rondas, los equipos se organizaron según los roles establecidos en la metodología 3.2. Los constructores se asignaron de acuerdo con el proceso constructivo que debían ejecutar y ya estaban familiarizados con el armado de ambos prototipos en este punto. Además, un observador se encargó de identificar las problemáticas relacionadas con los cuellos de botella de cada proceso. Por último, un tomador de tiempos registró el inicio y el fin de cada actividad de armado, así como el tiempo total del proceso de cada vivienda y de la ronda completa, utilizando una hoja de cálculo previamente diseñada y programada para facilitar su tarea. Esta hoja de cálculo fue creada para ambos prototipos de casas (Figura 10).

Proceso	Lote 1		Proceso	Lote 4	
	Inicio min + seg	Termino min + seg		Inicio min + seg	Termino min + seg
Zapata corrida	Inicio	Fin	Zapata corrida	Inicio	Fin
Contratrabe	Inicio	Fin	Contratrabe	Inicio	Fin
Firme	Inicio	Fin	Firme	Inicio	Fin
Muros	Inicio	Fin	Muros	Inicio	Fin
Losa	Inicio	Fin	Losa	Inicio	Fin
Pretiles	Inicio	Fin			
	Tiempo	Tiempo Acum		Tiempo	Tiempo Acum
Zapata corrida			Zapata corrida		
Contratrabe		00:00.0	Contratrabe		00:00.0
Firme		00:00.0	Firme		00:00.0
Muros		00:00.0	Muros		00:00.0
Losa		00:00.0	Losa		00:00.0
Pretiles		00:00.0			

Figura 10. Hoja de cálculo para registro del tiempo de procesos de cada prototipo

3.2.5 Análisis de los casos de armado

Posterior al juego, la actividad se enfocó en el uso del método de investigación de análisis de casos, donde se plantearon cuatro situaciones o casos de armado. En cada uno de ellos, hubo variaciones que cada equipo debía identificar. Dentro de este análisis, los equipos determinaron lo siguiente:

- Tiempos productivos por proceso
- Tiempos improductivos
- Tiempo de producción de cada lote y sus procesos
- Tiempo de producción total de la serie de 4 viviendas

Con esta información, se realizaron análisis e inferencias sobre los cuellos de botella, permitiendo concluir acerca de las diferentes metodologías y rondas.

RESULTADOS

Esta sección detalla los resultados obtenidos en cada una de las cuatro rondas de juego. En primer lugar, se revisan los resultados del armado de los prototipos A y B utilizando el proceso tradicional. A continuación, se analizan los resultados obtenidos mediante la aplicación del proceso Lean a los mismos prototipos. Entre los resultados se incluyen el tiempo productivo, el tiempo improductivo, los tiempos por lote y los tiempos de la serie completa de armado.

3.3 Resultados del caso 1: Armado del Prototipo A con el Proceso Tradicional

En el armado del Prototipo A utilizando el proceso tradicional, se observó un incremento en el tiempo productivo de un lote a otro. Este tiempo productivo totalizó 9 minutos y 55 segundos, equivalentes a 595 segundos, también conocido como tiempo de conversión (ver Figura 11). Este incremento en el tiempo de armado sugiere que, a medida que se avanzaba en los lotes, se presentaron dificultades adicionales, especialmente en el ensamblaje de los muros, donde varias personas enfrentaron problemas al realizar ensamblajes simultáneos.

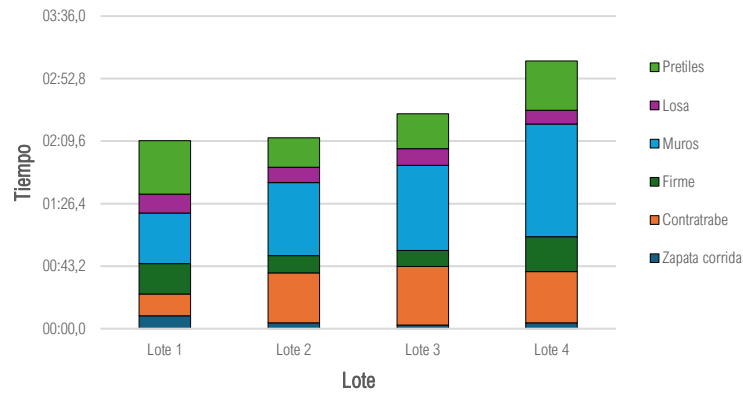


Figura 11. Tiempo productivo de armado Vivienda A con proceso tradicional

Análisis Detallado:

El análisis del tiempo productivo sugiere que la curva de aprendizaje esperada no se manifestó de manera consistente. Este aumento se debió a la complejidad de la tarea de muros pues requiere cierta destreza y la falta de familiaridad del equipo con dicha actividad a pesar de la capacitación inicial que tuvieron los estudiantes, lo cual debería investigarse más a fondo para identificar cuellos de botella y oportunidades de capacitación.

Tiempo Improductivo:

En cuanto al tiempo improductivo, se acumuló un total de 8 minutos y 52 segundos (532 segundos), también conocido como desperdicio o muda (ver Figura 12). Este tiempo improductivo fue notablemente alto durante la actividad de cimentación en los lotes 2 al 4, debido al tiempo necesario para reconfigurar las tareas y empezar un nuevo lote después de finalizar el anterior.

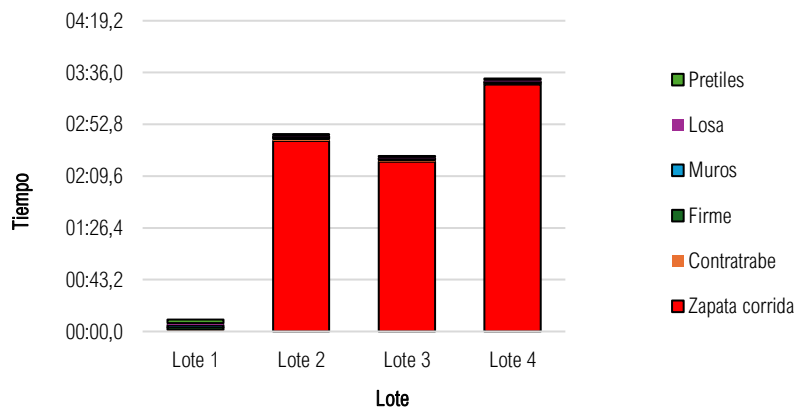


Figura 12. Tiempo improductivo de Vivienda A con proceso tradicional

Implicaciones:

El alto tiempo improductivo indica una necesidad crítica de optimización en la gestión del flujo de trabajo, especialmente en las transiciones entre tareas. La reducción de estos tiempos podría lograrse mediante una mejor planificación y sincronización de las actividades.

3.4 Resultados del caso 2: Armado del Prototipo B con el Proceso Tradicional

Para el Prototipo B, el tiempo de conversión mostró una disminución gradual desde el lote 1 al lote 4, con un total de 5 minutos y 27 segundos (327 segundos) (ver Figura 13). Esta disminución sugiere una mejora progresiva en las habilidades motrices del equipo, lo cual es un indicativo positivo de la curva de aprendizaje dentro del proceso.

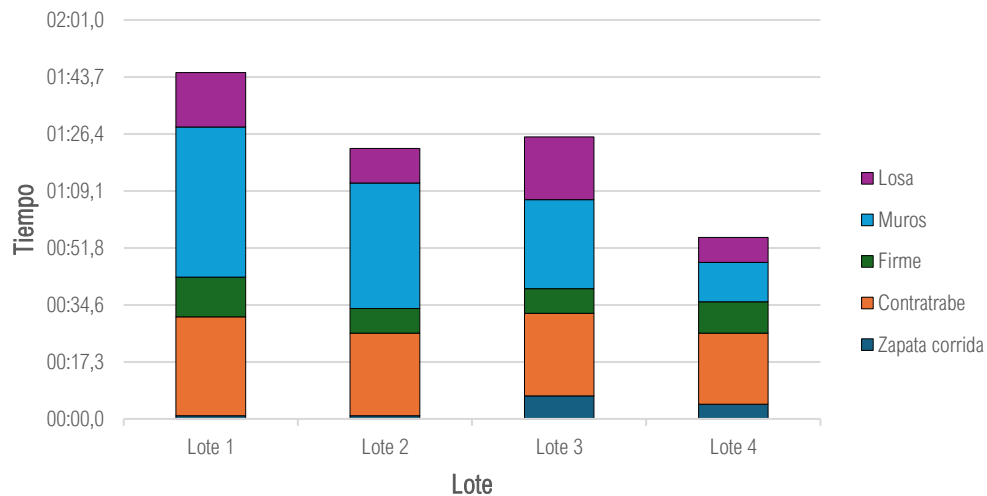


Figura 13. Tiempo productivo – Vivienda A con proceso tradicional

Análisis de la Curva de Aprendizaje:

La tendencia decreciente en el tiempo productivo es un claro indicador de la eficacia de las repetidas tareas.

Tiempo Improductivo:

El tiempo improductivo en este caso fue de 7 minutos y 21 segundos (441 segundos) (ver Figura 14). Al igual que en el Prototipo A, se observó una disminución gradual de este tiempo en cada lote, lo que podría indicar una mejora en la gestión del flujo de trabajo y una adaptación del equipo a las tareas, especialmente en el armado de la zapata corrida.

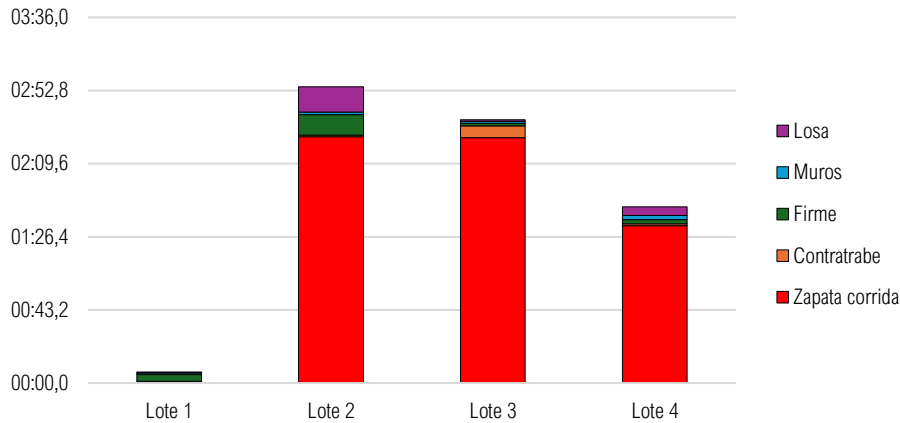


Figura 14. Tiempo improductivo de Vivienda B con proceso tradicional

Oportunidades de Mejora:

A pesar de la mejora en la eficiencia, el tiempo improductivo sigue siendo considerable. Es crucial analizar las causas subyacentes de este tiempo residual entre un lote y otro, con la actividad de cimentación, que incluyó la ineficiencia en la planificación de materiales o en la disposición del área de trabajo.

3.5 Resultados del caso 3: Armado del Prototipo A con el proceso Lean

Al implementar mejoras en el proceso Lean, el tiempo productivo para el armado de los cuatro lotes se redujo significativamente a 2 minutos y 0 segundos (120 segundos) (ver Figura 15). A diferencia del proceso tradicional, no se observó una tendencia clara de aumento o disminución en el tiempo de armado por lote, lo que sugiere una mayor consistencia en el rendimiento.

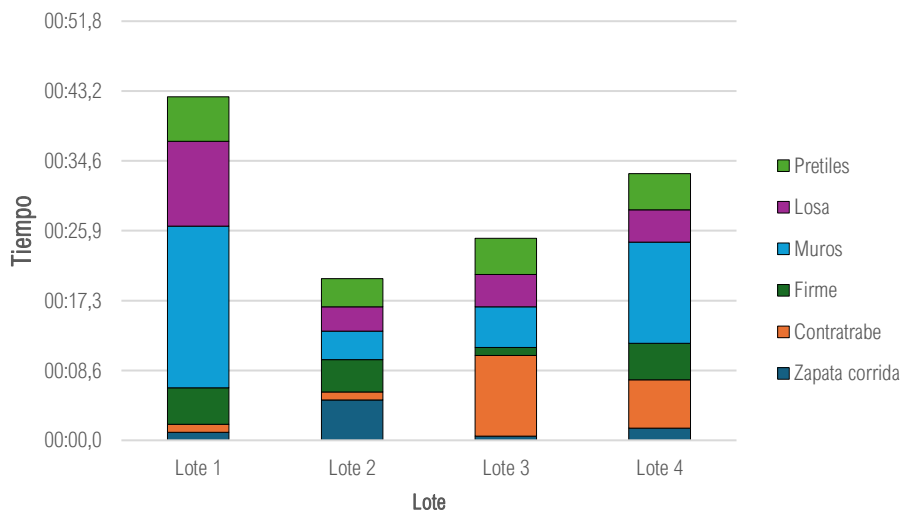


Figura 15. Tiempo productivo de Vivienda A con proceso Lean

Eficiencia del Proceso Lean:

La drástica reducción en el tiempo productivo muestra la efectividad de las técnicas Lean para eliminar pasos innecesarios y optimizar la cadena de valor. Este resultado subraya la

importancia de la estandarización y la capacitación continua en la implementación de procesos mejorados.

Tiempo Improductivo:

El tiempo improductivo total, considerando las pérdidas de los cuatro lotes, fue de 2 minutos y 10 segundos (130 segundos) (ver Figura 16). La falta de una tendencia clara en la reducción de este tiempo sugiere que, aunque se han reducido significativamente los desperdicios, siguen existiendo áreas de oportunidad, particularmente en la transición entre actividades.

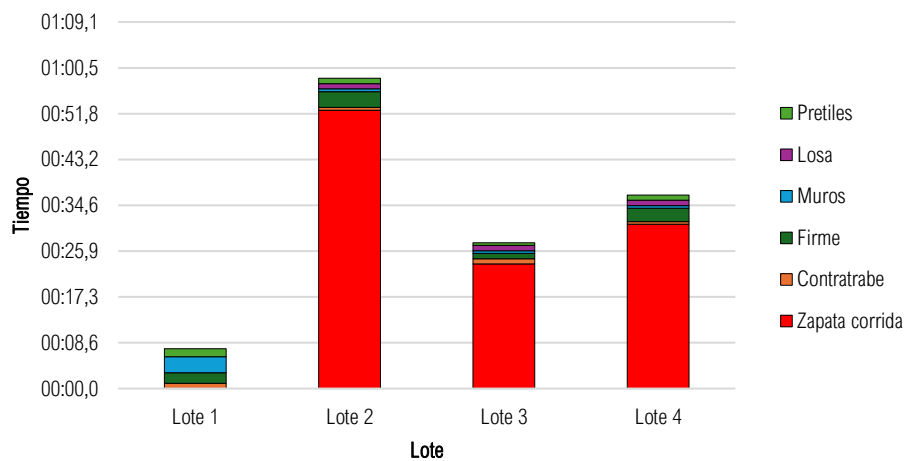


Figura 16. Tiempo improductivo Vivienda A con proceso Lean

En la figura anterior, se puede apreciar que la cimentación corrida representa el mayor tiempo improductivo, ya que hubo un tiempo de transición significativo entre el término de un lote y el inicio del siguiente.

Implicaciones para la Mejora Continua:

El enfoque Lean ha demostrado su eficacia, pero aún hay margen para mejoras adicionales en la reducción de tiempos de espera y transición sobre todo entre el final del armado de un lote y el comienzo con la cimentación del siguiente. Una evaluación de los micro movimientos y la optimización de la secuencia de tareas podría llevar a un proceso aún más eficiente.

3.6 Resultados del caso 4: Armado del Prototipo B con el proceso Lean

En el Prototipo B, bajo el proceso Lean, el tiempo productivo fue de 2 minutos y 23 segundos (143 segundos) para las cuatro viviendas (ver Figura 17). Se observó una tendencia clara de aumento en los tiempos, especialmente durante el ensamblaje de la losa a dos aguas, lo que podría indicar desafíos específicos en esta etapa del proceso.

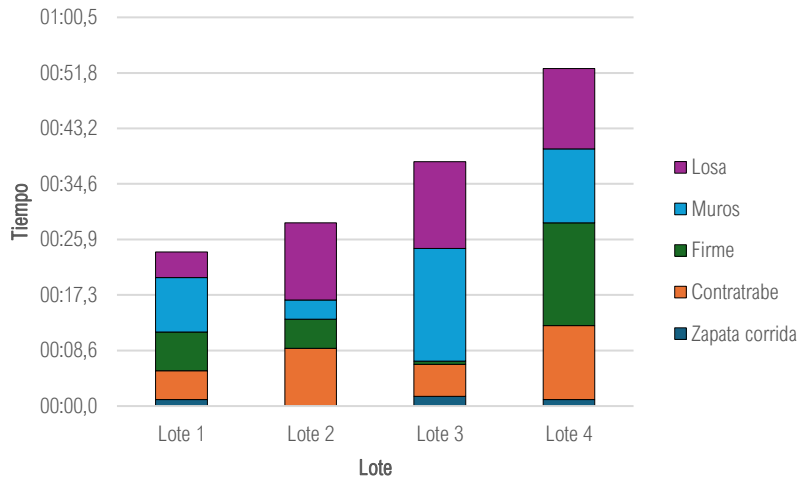


Figura 17. Tiempo productivo Vivienda B con proceso Lean

Análisis del Ensamblaje:

La tendencia al alza en los tiempos durante el ensamblaje de la losa sugiere la necesidad de revisar esta fase específica del proceso. Podría ser beneficioso realizar un análisis detallado de esta tarea para identificar posibles puntos de ineficiencia o requerimientos adicionales de capacitación.

Tiempo Improductivo:

El tiempo improductivo en este proceso fue de 2 minutos y 22 segundos (142 segundos) (ver Figura 18). Este tiempo incluyó períodos de espera entre el comienzo del armado de un lote y el final del anterior que aumentaron progresivamente, lo que indica la presencia de cuellos de botella e ineficiencias acumulativas.

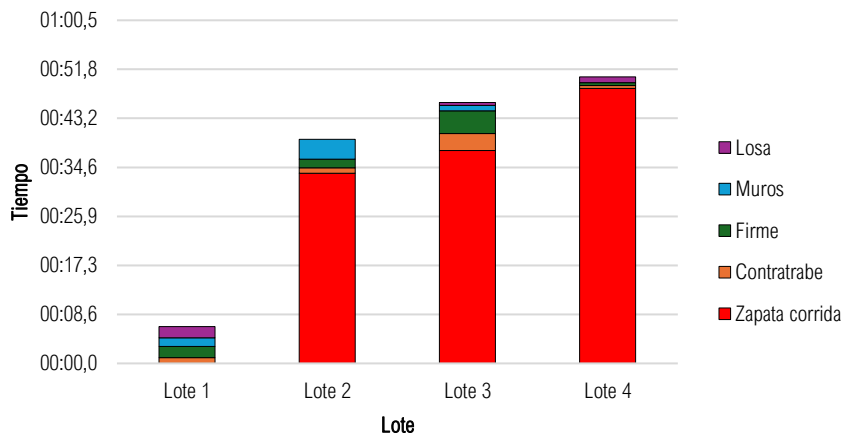


Figura 18. Tiempo improductivo Vivienda B con proceso Lean

Evaluación de Cuellos de Botella:

La aparición de cuellos de botella en el proceso Lean, a pesar de la reducción general en el tiempo improductivo, sugiere la necesidad de realizar un análisis más detallado del

flujo de trabajo para identificar y mitigar estas restricciones antes de que se conviertan en problemas más significativos.

3.7 Comparativas

La siguiente sección presenta una comparación detallada de los tiempos productivo e improductivo entre el proceso tradicional y el proceso Lean en los prototipos A y B, destacando las mejoras significativas logradas con la implementación del enfoque Lean (ver tabla 6).

3.7.1 Prototipo A

El Prototipo A mostró variaciones notables entre los dos procesos:

Tiempo Productivo: Se logró una reducción significativa del tiempo de armado de 595 a 120 segundos, lo que representa una mejora del 79.83%. Este resultado demuestra la efectividad del proceso Lean en la eliminación de actividades innecesarias y la optimización del flujo de trabajo.

Tiempo Improductivo: El tiempo improductivo se redujo de 532 a 130 segundos, lo que corresponde a una disminución del 75% en el desperdicio. Esta reducción es indicativa de una mejora en la eficiencia general y una mejor gestión del tiempo entre actividades.

3.7.2 Prototipo B

En el Prototipo B también se observaron mejoras notables

Tiempo de Armado (Productivo): El tiempo se redujo de 327 a 143 segundos, representando una mejora del 56.26%. Aunque menor en comparación con el Prototipo A, esta mejora sigue siendo significativa y refleja los beneficios del enfoque Lean.

Tiempo Improductivo: Se observó una reducción del tiempo improductivo de 441 a 142 segundos, lo que equivale a una disminución del 67.80%. Esta reducción subraya la eficacia del proceso Lean para identificar y eliminar ineficiencias dentro del proceso.

Tabla 6. Comparativa de tiempo entre los procesos tradicionales y Lean

Prototipo	Rondas Proceso Tradicional		Rondas Lean	
	Tiempo de armado (seg)	Tiempo improductivo (seg)	Tiempo de armado (seg)	Tiempo improductivo (seg)
Prototipo A	595	532	120	130
Prototipo B	327	441	143	142

Conclusiones de la Comparativa:

De acuerdo con la tabla 6, la implementación del proceso Lean resultó en mejoras significativas en la reducción tanto del tiempo productivo como del improductivo en ambos prototipos. Estos resultados confirman la hipótesis de que la optimización de procesos mediante la metodología Lean puede conducir a incrementos notables en la eficiencia y a la disminución de desperdicios. En este estudio, la reducción se sitúa entre el 67% y el 75%, lo que se traduce en una mayor productividad y calidad en el ensamblaje

de los prototipos. Un aspecto que merece investigación futura es la discrepancia en los tiempos de armado entre los prototipos A y B. Se esperaba que el prototipo B, al contar con menos procesos de ensamblaje, tuviera tiempos de armado menores en comparación con el prototipo A, tanto en la ronda del proceso tradicional como en la ronda Lean. Sin embargo, esto solo se cumplió en el proceso tradicional. Será necesario investigar si factores como la prefabricación en las rondas Lean influyeron en que el prototipo A tuviera tiempos de armado más cortos, a pesar de incluir más procesos.

CONCLUSIONES

En definitiva, el juego de Lean Construction permitió una implementación práctica de los principios de Lean Construction, demostrando a los estudiantes sus ventajas en la ejecución de viviendas. Las técnicas como el trabajo en equipo, las personas multifuncionales, la prefabricación y las 5's se revelaron como estrategias potentes, cuya efectividad se visualizó durante las rondas del juego. Al completar las cuatro rondas, los estudiantes notaron una reducción en los tiempos productivos o de conversión, los cuales representan los tiempos de armado de las viviendas y son mucho menores en los procesos lean que en los tradicionales. Asimismo, los tiempos improductivos disminuyeron significativamente, mejorando la presencia del flujo continuo en las actividades de armado. Por otra parte, la retroalimentación y la obtención de resultados fue de manera inmediata como se pensó en un inicio pues, gracias a la automatización, se obtuvieron gráficas y métricas de productividad de forma rápida y oportuna para poder discutir en clase los resultados. También el armado de las viviendas fue relativamente sencillo de hacer, capacitando previamente a los estudiantes para evitar el sesgo de los resultados producto de curvas de aprendizaje significativas. El juego funcionó bien y permite visualizar los principios de la filosofía Lean de forma simple. Definitivamente, los alumnos experimentaron un aprendizaje significativo. No obstante, aunque los estudiantes mencionaron este aprendizaje durante clase, los resultados no fueron formalmente documentados en la presente investigación. Por ello, para futuros estudios, se recomienda cuantificar el aprendizaje de los estudiantes en relación con el uso del juego como herramienta didáctica. Este aprendizaje debería evaluarse tanto cuantitativa como cualitativamente, tomando en cuenta la percepción de los estudiantes sobre el grado de conocimiento adquirido. Además, sería valioso comparar estos resultados con los porcentajes establecidos en la pirámide del aprendizaje. Por otra parte, se observaron algunos cuellos de botella, ineficiencias y discrepancias que podrían ser estudiados en futuras implementaciones del juego para lograr mayor eficiencia de los procesos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias al invaluable apoyo del Tecnológico de Monterrey, institución que proporcionó los recursos necesarios para su desarrollo, a través del Departamento de Tecnologías Sostenibles e Ingeniería Civil Departamento de Ingeniería Civil y del Dr. Salvador García por su dedicación y la valiosa ayuda para la realización de este artículo. Agradecemos a la Maestra Marisol Solís, cuyas contribuciones en la estructura del artículo y en la parte educativa fueron esenciales.

REFERENCIAS

- Bhatnagar, S., Jacob, G., Devkar, G., Rybkowski, Z. K., Arefazar, Y., & Obulam, R. (2023). A systematic review of lean simulation games in the construction industry. *Architectural Engineering and Design Management*, 19(6), 701–719. <https://doi.org/10.1080/17452007.2022.2155604>
- Gómez Cabrera, A., & Sánchez Rivera, Ó. G. (2023). Gamificación en la enseñanza de Lean Project Management en ingeniería civil. *EIEI ACOFI 2023*, 1–13. <https://doi.org/10.26507/paper.2796>
- Gonzalez, V., Senior, B., Orozco, F., Alarcón, L. F., Ingle, J., & Best, A. (2014). Simulating lean production principles in construction: a last planner-driven game. *International Group for Lean Construction Conference 22*, 1221–1232.
- ITESM. (2024). Modelo Tec 21. <https://tec.mx/es/modelo-tec>
- Jacobsen, E. L., Strange, N. S., & Teizer, J. (2021). Lean Construction in a Serious Game Using a Multiplayer Virtual Reality Environment. *International Group for Lean Construction Conference 29*, 55–64. <https://doi.org/10.24928/2021/0160>
- Lucko, G., & Senior, B. A. (2022). Ontology for Virtualization of Lean Construction Games. *Lean Construction Journal*, 1.
- Masters, K. (2020). Edgar Dale’s Pyramid of Learning in medical education: Further expansion of the myth. *Medical Education*, 54(1), 22–32. <https://doi.org/10.1111/medu.13813>
- Pons, J. F. (2018). THE FLOW BUILDING® LEAN GAME: UNA DINÁMICA INNOVADORA CREADA EN ESPAÑA PARA LA ENSEÑANZA DE LEAN CONSTRUCTION. *CONTART 2018: VII Convención de La Edificación*, 100–110.
- Sacks, R., & Goldin, M. (2007). Lean Management Model for Construction of High-Rise Apartment Buildings. *Journal of Construction Engineering and Management*, 133(5), 374–384. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2007\)133:5\(374\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2007)133:5(374))
- Sato, D., & Trindade, F. (2009). The Lego Lean Game (pp. 192–193). https://doi.org/10.1007/978-3-642-01853-4_26
- Warcup, R., & Reeve, E. (2014). Using the Villego® Simulation to Teach the Last Planner® System. *Lean Construction Journal*, 1–15. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:148231715>