

Automation of pre-assembly BIM, Dynamo and Augmented Reality to optimize execution time of metal formwork for vertical elements in multi-family

Neily Altamirano¹; Melvin Churata²; Jorge De la Torre³

^{1,2} universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, u20211b979@upc.edu.pe, u202114678@upc.edu.pe

³Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, PCCIJDEL@upc.edu.pe

Abstract– In multi-family housing projects in Metropolitan Lima, vertical metal formwork is a critical activity that often causes schedule delays.

Therefore, this research evaluates the automation of pre-assembly using Building Information Modeling (BIM), Dynamo, and Augmented Reality (AR). To reduce execution times, a methodology was applied that integrates automated modeling processes in Revit and Dynamo, as well as construction simulation in Navisworks, to analyze the performance and productivity of the metal formwork. Augmented Reality was used as a real-time visualization tool to guide on-site assembly. Finally, the proposal was validated through expert judgment in the construction sector, ensuring its relevance and applicability. The results obtained show a 79 % improvement in performance, a 70 % reduction in labor costs, and a 41 % increase in the Schedule Performance Index (SPI). These findings demonstrate that automating pre-assembly using BIM, Dynamo, and AR allows for a significant optimization of the execution times of vertical metal formwork, making it an innovative, efficient, and applicable solution for improving productivity and performance on site.

Keywords- Formwork, Pre-assembly, BIM, Augmented Reality, Execution Time

Automatización del prearmado con BIM, Dynamo y Realidad Aumentada para optimizar el tiempo de ejecución de encofrados metálicos de elementos verticales en viviendas multifamiliares

Neily Altamirano¹; Melvin Churata²; Jorge De la Torre³

^{1,2} universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, u20211b979@upc.edu.pe, u202114678@upc.edu.pe

³Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, PCCIJDEL@upc.edu.pe

Resumen– En los proyectos de viviendas multifamiliares en Lima Metropolitana, los encofrados metálicos verticales constituyen una actividad crítica que frecuentemente genera retrasos en el cronograma de obra. En este contexto, la presente investigación evalúa la automatización del prearmado mediante el uso de Building Information Modeling (BIM), Dynamo y Realidad Aumentada (RA), con el objetivo de reducir los tiempos de ejecución.

Para ello, se aplicó una metodología que integra procesos automatizados de modelado en Revit y Dynamo, junto con la simulación constructiva en Navisworks, permitiendo analizar el rendimiento y la productividad del encofrado metálico. La Realidad Aumentada se empleó como herramienta de visualización en tiempo real para guiar el ensamblaje en obra.

La propuesta fue validada mediante juicio de expertos del sector construcción, asegurando su pertinencia y aplicabilidad. Los resultados obtenidos evidencian una mejora del 79 % en rendimiento, una reducción del 70 % en cuantía de mano de obra y un incremento del 41 % en el índice de desempeño del cronograma (SPI).

En conclusión, la automatización del prearmado mediante BIM, Dynamo y RA permite optimizar significativamente los tiempos de ejecución de los encofrados metálicos verticales, constituyéndose en una solución innovadora, eficiente y aplicable para mejorar la productividad y el desempeño en obra.

Palabras Clave: Encofrado, prearmado, BIM, Realidad Aumentada, Tiempo de ejecución

I. INTRODUCCIÓN

A. Problemática:

En el sector de la construcción se identifica que el 80 % de las obras civiles en Perú presentan retrasos en la entrega de proyectos [1]. Según estudios realizados se revela que el encofrado es una de las actividades más intensivas en tiempo durante la construcción de un proyecto, representando cerca del

30 % del tiempo total invertido en la estructura [2]. Asimismo, la falta de información clara respecto al material y método de encofrado más eficiente ocasiona retrasos en el cronograma maestro establecido [3].

B. Estado del arte:

Uno de los principales problemas en los proyectos de viviendas multifamiliares es el retraso en los tiempos de ejecución, especialmente en actividades críticas como el encofrado. Asimismo, el montaje y desmontaje de encofrados metálicos verticales representan etapas altamente demandantes en tiempo dentro del proceso constructivo. Sin embargo, estos retrasos no solo se deben a la naturaleza de la actividad, sino también a deficiencias en la planificación, selección de materiales y falta de innovación tecnológica en obra [4]. En este sentido, los enfoques tradicionales resultan insuficientes para garantizar el cumplimiento del cronograma, evidenciando la necesidad de soluciones más integradas y tecnológicamente avanzadas.

En este contexto, el uso de Building Information Modeling (BIM) ha demostrado ser una herramienta eficaz para modelar y planificar digitalmente el proceso de encofrado, permitiendo anticipar interferencias, mejorar la precisión del cronograma y reducir desperdicios [5], [6]. Asimismo, su integración con tecnologías como IoT facilita la toma de decisiones en tiempo real [7]. No obstante, la mayoría de estos estudios se centran en la planificación y coordinación, sin abordar directamente la optimización en campo. En consecuencia, limita su impacto en la reducción de tiempos de ejecución en actividades operativas como el montaje de encofrados.

Ante estas limitaciones, el prearmado de encofrados metálicos se presenta como una estrategia efectiva para trasladar procesos a entornos controlados, reduciendo tiempos de montaje en campo, minimizando errores humanos y mejorando la

productividad [8]. Además, optimiza el flujo de trabajo y permite ejecutar actividades de manera simultánea, generando beneficios en términos de cronograma y seguridad [9]. Sin embargo, su implementación sigue siendo manual o poco estandarizada, lo que limita su potencial de optimización.

Con el fin de mejorar la ejecución en campo, la realidad aumentada (RA) ha sido aplicada en el sector construcción como una herramienta para optimizar la visualización del proceso constructivo, facilitando el montaje y reduciendo errores de interpretación [10]. Estudios recientes reportan incrementos de hasta un 15 % en productividad y mejoras en la curva de aprendizaje, evidenciando su potencial en la capacitación y supervisión técnica [11], [12]. No obstante, su aplicación suele desarrollarse de forma independiente, sin integrarse con sistemas de planificación o modelado automatizado.

Considerando la importancia de estas tecnologías en la mejora del proceso constructivo, es necesario resaltar que los encofrados metálicos verticales constituyen una fase crítica debido a su carácter repetitivo y su alta precisión. En este contexto, enfoques como la ingeniería de valor han permitido optimizar su selección y planificación, reduciendo tiempos y costos sin afectar la calidad estructural [13]. Asimismo, el uso de materiales innovadores ha demostrado mejoras en resistencia y durabilidad [14].

En este sentido, la automatización mediante Dynamo aplicado a Revit se presenta como una herramienta clave para complementar las capacidades de BIM en la optimización de procesos. Su uso mejora la gestión de la información y el modelado al reducir tareas repetitivas, automatizar la generación de parámetros y asegurar la consistencia de los modelos BIM [15]. Además, contribuye al control de calidad mediante la detección automática de errores y la estandarización de procesos. Sin embargo, su aplicación se ha centrado en la fase de modelado, sin explorar completamente su potencial en la automatización de procesos constructivos específicos.

A partir de lo expuesto, se evidencia que, pese a los avances en el uso de BIM, prearmado, realidad aumentada y automatización mediante Dynamo, estas tecnologías han sido aplicadas de forma independiente. En consecuencia, se identifica una brecha en su integración para optimizar el tiempo de ejecución en encofrados metálicos verticales, lo cual constituye el enfoque principal de la presente investigación.

C. Propuesta

Esta investigación evalúa la automatización del prearmado mediante BIM, Dynamo y Realidad Aumentada como una solución innovadora para optimizar el tiempo de ejecución de encofrados metálicos en elementos verticales de viviendas multifamiliares. La propuesta integra estas tecnologías para mejorar la planificación, reducir tiempos improductivos y agilizar el montaje en obra. En este enfoque, Dynamo automatiza el modelado del prearmado, BIM permite desarrollar y simular la secuencia constructiva, y la Realidad Aumentada facilita la instalación mediante una visualización en tiempo real del sistema de encofrado.

D. Aporte

La automatización del prearmado mediante BIM, Dynamo y Realidad Aumentada optimiza el tiempo de ejecución de encofrados metálicos en elementos verticales de viviendas multifamiliares. BIM mejora la planificación y la secuencia constructiva, Dynamo reduce errores y tiempos de modelado, y la Realidad Aumentada incrementa la precisión y eficiencia del montaje mediante visualización en tiempo real. En conjunto, estas herramientas elevan la productividad, estandarizan el proceso y mejoran la eficiencia global del sistema de encofrado.

II. MATERIALES Y METODOS

A. Herramientas

1) Prearmado

Los encofrados prearmados o modulares, conformados por elementos estandarizados, permiten un ensamblaje rápido y preciso en obra [16]. Su uso optimiza los tiempos de montaje y desmontaje, reduce costos de mano de obra y mejora la planificación del proyecto, siendo una solución eficiente para entornos constructivos con plazos exigentes.

2) BIM

Se emplea Revit para el modelado 3D de los componentes del encofrado metálico prearmado, permitiendo una representación detallada y su integración en el entorno BIM [16]. Posteriormente, Navisworks se utiliza para simular secuencialmente el proceso de ensamblaje, identificar interferencias y estimar los tiempos de ejecución [17].

3) Dynamo

El Dynamo se emplea como una herramienta innovadora que permite automatizar procesos y generar familias 3D en Revit de forma rápida y precisa [18]. De esta forma se puede monitorear de forma más precisa el avance diario que se desarrolla en el montaje de encofrados.

4) Realidad Aumentada

Para la visualización mediante realidad aumentada se emplea Unity 3D en conjunto con Vuforia Engine. Esta plataforma es esencial para el desarrollo de aplicaciones innovadoras en la construcción [18].

Para ello, se configura una aplicación para Android en la que se ingresa con el escaneo de un código QR, el cual proyecta el modelo BIM del encofrado completo sobre el entorno real. Esto permite al usuario identificar con anticipación la ubicación exacta de los paneles, minimizando errores de ensamblaje y optimizando el proceso constructivo antes de ser ejecutado. La RA mejora el control del tiempo y costo de la obra. [19]

5) Encuesta - Juicio de expertos

Con el fin de validar tanto la problemática identificada como la viabilidad de la solución propuesta, se aplica la técnica de juicio de expertos. Esta herramienta permite corroborar los planteamientos de la investigación y evaluar la solución planteada [20]

La encuesta fue diseñada con una escala de tipo Likert, estructurada para recoger percepciones en torno a la eficacia, aplicabilidad y beneficios de la propuesta. Participaron

profesionales del sector construcción con experiencia comprobada en proyectos de viviendas multifamiliares en Lima Metropolitana.

6) Indicadores del problema

Para evaluar la viabilidad de la propuesta se establecen indicadores cuantitativos y cualitativos, los cuales se evidencian en la tabla 1. Estos indicadores establecen meta de aceptación para cada análisis establecido.

Tabla 1
Indicadores del problema

Ítem	Indicador	Tipo	Unidad de medida	Meta de aceptación
1	Nivel de incremento del rendimiento del encofrado [21]	Cuantitativo	$\frac{m^2}{día}$	$X \geq 17.77$
				$\frac{m^2}{día}$ O $X \geq 77.47 \%$
2	Nivel de optimización del tiempo respecto a la productividad [22]	Cuantitativo	$\frac{HH}{m^2}$	$X \leq 0.8495$
				$\frac{HH}{m^2}$ O $X \leq 84.95 \%$
3	Nivel de desempeño en el cronograma (SPI) [23]	Cuantitativo	Adimensional	$X \geq 0.92$ O $X \geq 92 \%$
4	Nivel de satisfacción del cliente [20]	Cualitativo	Escala Likert	[4-5]

B. Metodología

Este artículo se desarrolla en tres fases principales, como se evidencia en la fig. 1: problemática, diseño de la propuesta de solución, resultados y análisis.

En la primera fase, se identifican los factores de retraso en los encofrados metálicos verticales mediante revisión bibliográfica y validación con juicio de expertos.

En la segunda fase, se plantea la solución de automatización del prearmado de encofrados metálicos, modelando la propuesta en Revit, automatizando procesos de modulación y ensamblaje con Dynamo y generando la secuencia constructiva en Navisworks. La solución se complementa con la interfaz de realidad aumentada en Unity 3D, accesible mediante códigos QR o dispositivos HMD, para guiar en el montaje. Su eficacia se compara con el método tradicional y se valida con juicio de expertos.

En la tercera fase se evalúa la viabilidad de la propuesta según indicadores de tiempo, rendimiento y aplicabilidad, formulando conclusiones comparando los resultados con el método tradicional.

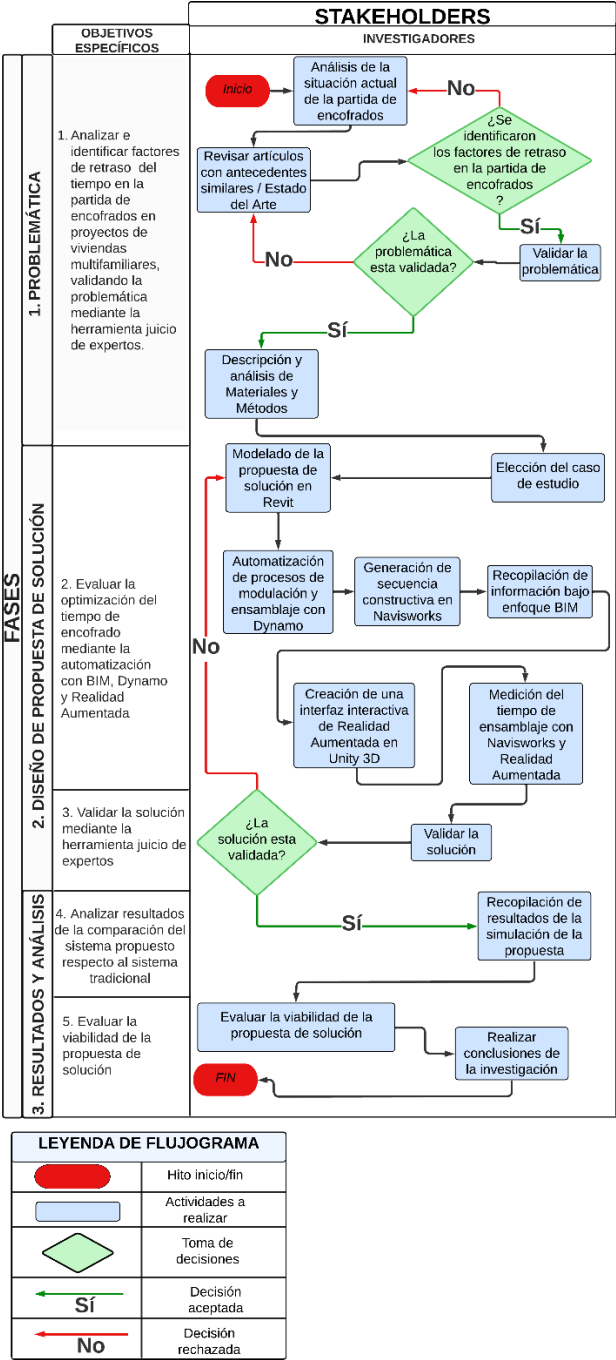


Fig. 1 Flujoograma de metodología de investigación

III. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Para el modelado y la implementación de la propuesta, se seleccionó como caso de estudio una vivienda multifamiliar con características estándar que se repiten en la mayoría de los proyectos de la misma índole, tales como: Tipología estructural, la complejidad del diseño y las condiciones de ejecución de obra.

Sin embargo, el enfoque metodológico basado en la integración de BIM, automatización mediante Dynamo y visualización con

Realidad Aumentada es escalable y transferible, lo que permite su adaptación a distintos escenarios constructivos, manteniendo su potencial de mejora en la productividad y el control del tiempo.

Este proceso inició con la elaboración del modelo de encofrados en Revit, constituyendo el punto de partida para la aplicación de la metodología BIM dentro de la solución planteada.

A partir de esta implementación se obtuvo una mejora significativa en los tiempos de ejecución del encofrado metálico vertical en viviendas multifamiliares. Para su validación, se emplearon tres indicadores clave: rendimiento, cuantía de mano de obra e índice de desempeño del cronograma (SPI). Además, se incluyó un análisis de validación de solución mediante juicio de expertos.

A) Resultados BIM:

1) Resultados Revit:

El modelado del sistema de encofrado se desarrolla en Revit mediante la creación de familias paramétricas para cada componente. Posteriormente, se modela los elementos estructurales verticales y horizontales, permitiendo la integración de las familias de encofrado en el entorno BIM. Este proceso facilita una representación precisa del sistema constructivo y su posterior análisis.

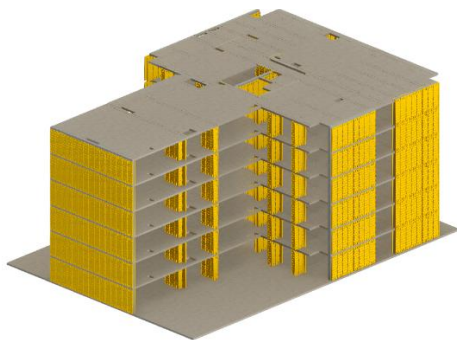


Fig. 2 Encofrados de elementos verticales de todos los pisos típicos

2) Resultados Dynamo

Con el software Dynamo se realiza el script para la automatización del proceso de modulación del encofrado metálico en elementos verticales. Para ello en Revit se debe configurar correctamente las familias con sus parámetros, seleccionar los elementos en Dynamo, procesar sus datos para ordenarlos y agruparlos según criterios como nivel, eje o columna. Luego, se crean grupos automáticos mediante funciones de listas, se incorpora un control de navegación para visualizar cada grupo y se valida la selección en Revit en vistas 2D y 3D. Finalmente, el modelo automatizado se exporta a Navisworks para generar la simulación 4D y se deja preparado para su integración con plataformas de realidad aumentada. En la fig. 3 se visualiza el script completo que reúne estos procesos de automatización desarrollados en Dynamo.

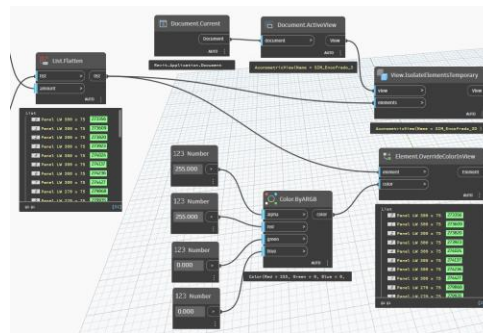


Fig. 3 Script de procesos de automatización en Dynamo

3) Resultados Navisworks

Con el modelado 3D de los componentes del encofrado en Revit, se logra una visualización detallada en BIM. Luego, con Navisworks, se simula el proceso constructivo, permitiendo detectar interferencias y planificar la secuencia de actividades como se muestra en la fig. 4. La simulación mostró una reducción de hasta un 30 % en el tiempo de instalación en comparación con el sistema tradicional.



Fig. 4 Secuencia constructiva en Navisworks

B) Visualización de Realidad Aumentada

A través de Unity 3D se desarrolla una interfaz que permite proyectar el proceso constructivo en Realidad Aumentada (RA) desde dispositivos Android mediante códigos QR, como se evidencia en la fig. 5. Esto facilita el montaje guiado del encofrado por parte del personal técnico, reduciendo errores y acelerando la curva de aprendizaje.

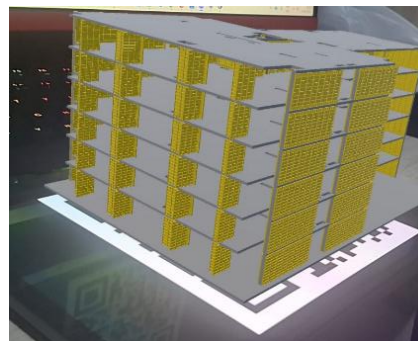


Fig. 5 Visualización de RA en un entorno real

C) Evaluación de rendimiento

Muro estructural compuesto por 16 paneles de encofrado (2.50*0.75).

Rendimiento para dos columnas de 9 paneles c/u.

$$Rend_{Muro} = 16 \times 2.50 \times 0.75 = 30 \text{ m}^2/\text{día}$$

$$Rend_{Columna} = 18 \times 2.50 \times 0.75 = 33.75 \text{ m}^2/\text{día}$$

$$Rend_{Columna+Muro} = \frac{30 + 33.75}{2} = 31.875 \text{ m}^2/\text{día}$$

Se obtiene un rendimiento de $31.875 \frac{\text{m}^2}{\text{día}}$ por operario.

D) Evaluación de cálculo de cuantía

$$\rho_{muro} = \frac{8HH}{30 \text{ m}^2} = 0.2667 \text{ HH/m}^2$$

$$\rho_{muro} = \frac{8HH}{33.75 \text{ m}^2} = 0.237 \text{ HH/m}^2$$

$$\rho_{muro+columna} = \frac{0.2667 + 0.237}{2} = 0.2519 \text{ HH/m}^2$$

E) Evaluación del índice del desempeño del cronograma (SPI)

Pisos típicos = 6

Total de Paneles = 286/piso

Metrado Total = 3217.5 m^2

Nº de operarios = 5

$$SPI = \frac{\text{Valor planificado}}{\text{Valor Real}}$$

$$\frac{3217.5 \text{ m}^2}{31.875 \text{ m}^2/\text{día} \times 5} = 20.18 \approx 21 \text{ días}$$

$$SPI = \frac{28 \text{ días}}{21 \text{ días}} = 1.33$$

Con los resultados obtenidos se realiza una validación acorde a los indicadores planteados, en la cual se plantea una comparativa entre la situación actual del problema y la propuesta de solución.

F) Validación del rendimiento:

El rendimiento aproximado para un encofrado metálico es de $17.77 \text{ m}^2/\text{día}$ representando un 77.47 % [21]. Según los resultados obtenidos en la propuesta planteada, el rendimiento promedio es de $31.875 \text{ m}^2/\text{día}$ representando un 138.96 %, esto evidencia el cumplimiento del indicador e implica una mayor eficiencia en la ejecución de encofrados, acelerando el avance de la estructura sin incrementar recursos.

En base al primer indicador se realiza una comparativa entre el rendimiento actual y propuesto, presentado en la siguiente tabla:

Tabla 2
Resultados de validación del rendimiento de encofrados

Indicador	Unidad	Meta de aceptación		Propuesta	Validación
Nivel de incremento del rendimiento de encofrado	$\frac{\text{m}^2}{\text{día}}$	17.77 (77.47 %) [21]	<	31.875 (138.96 %)	Cumple

G) Validación de la cuantía:

La cuantía aproximada para un encofrado metálico es de 0.8495 HH/m^2 representando un 84.95 % [22]. Acorde a los resultados, la cuantía promedio de la propuesta planteada es de 0.2519 HH/m^2 representando un 25.19 %. Este resultado refleja una mejor planificación de la mano de obra en campo, evitando retrabajos y reduciendo la dependencia de la habilidad del operario.

En base al segundo indicador se realiza una comparativa entre la cuantía actual y propuesto, presentado en la siguiente tabla:

Tabla 3
Resultados de validación de la cuantía de encofrados

Indicador	Unidad	Meta de aceptación		Propuesta	Validación
Nivel de optimización del tiempo respecto a la productividad	$\frac{\text{HH}}{\text{m}^2}$	0.8495 (84.95 %) [22]	>	0.2519 (25.19 %)	Cumple

H) Validación del SPI:

El índice de desempeño del cronograma (SPI) base es de 0.92 [23]. Según los cálculos realizados para la propuesta planteada se obtuvo que el SPI promedio es de 1.33 representando un aumento en un 42 %. Este resultado resalta una planificación más precisa, mejorando el control del tiempo y la confiabilidad del cronograma en actividades críticas como el encofrado.

En base al tercer indicador se realiza una comparativa entre el SPI actual y propuesto, presentado en la siguiente tabla:

Tabla 4
Resultados de validación del desempeño del cronograma

Indicador	Unidad	Meta de aceptación		Propuesta	Validación
Nivel de desempeño del cronograma	-	0.92 (92 %) [23]	<	1.33 (133 %)	Cumple

1) Validación de la problemática mediante Juicio de expertos

La Validación de juicio de expertos se realizó mediante encuestas a profesionales del rubro de la construcción en el cual se obtuvo un nivel de satisfacción promedio de 4.5 en escala Likert, lo que respalda la viabilidad y aplicabilidad de la propuesta en contextos reales de construcción.

Tabla 5
Validación de la problemática mediante juicio de expertos

Indicador	Unidad	Meta de aceptación	Propuesta	Validación
Nivel de satisfacción del cliente	Escala Likert	[3-4] [20]	< [4.5]	Cumple

Las siguientes Figuras muestran las preguntas planteadas y los resultados obtenidos mediante la aplicación de esta herramienta.



Fig. 6 Dashboard de Power BI de la pregunta N°01 planteada en la encuesta de juicio de expertos

Pregunta N°01: En la ejecución de la estructura (casco) de una edificación, según su experiencia, ¿Cuál de estas partidas considera que requiere más tiempo en la etapa ejecución?

En relación con la pregunta N°01 de la encuesta, la fig. 6, mediante el uso del diagrama de Pareto, muestra y confirma que el encofrado es la actividad más crítica y frecuente. Por lo tanto, es el principal factor que contribuye a los retrasos y a la alta demanda de tiempo en la ejecución estructural.

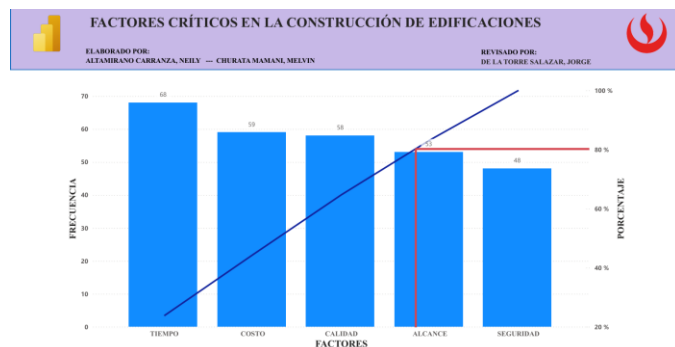


Fig. 7 Dashboard de Power BI de la pregunta N°02 planteada en la encuesta de juicio de expertos

Pregunta 02: Según su experiencia, ¿Qué factores cree usted que generan mayores problemas en la construcción de edificaciones?

En función a la pregunta N°02 planteada en la encuesta. La fig. 7 mediante la herramienta de diagrama de Pareto, exhibe que el tiempo es el factor más crítico con una frecuencia de 68, seguido por el costo y la calidad. Estos tres factores representan aproximadamente el 80 % del impacto acumulado, por lo que implementar mejoras en el mayor factor de impacto puede generar mayores beneficios en la ejecución de edificaciones.



Fig. 8 Dashboard de Power BI de la pregunta N°03 planteada en la encuesta de juicio de expertos

Pregunta N°03: Según su experiencia, ¿Cuál de los siguientes sistemas de encofrado son más utilizados en la construcción de edificaciones multifamiliares?

En relación con la pregunta N°03 de la encuesta, la fig. 8, a través del diagrama de Pareto, evidencia que los sistemas de encofrado más empleados en edificaciones multifamiliares son los metálicos. La curva de porcentaje acumulado revela que, en conjunto, los encofrados metálicos y de madera representan aproximadamente el 80 % del total, lo que confirma el cumplimiento del principio de Pareto. Este resultado indica que dichas categorías concentran la mayor parte del impacto en el tema de investigación. En consecuencia, para lograr una optimización efectiva de los sistemas de encofrado, resulta estratégico concentrar los esfuerzos de mejora en los encofrados metálicos, ya que son los que presentan la mayor incidencia en comparación con las otras alternativas analizadas.

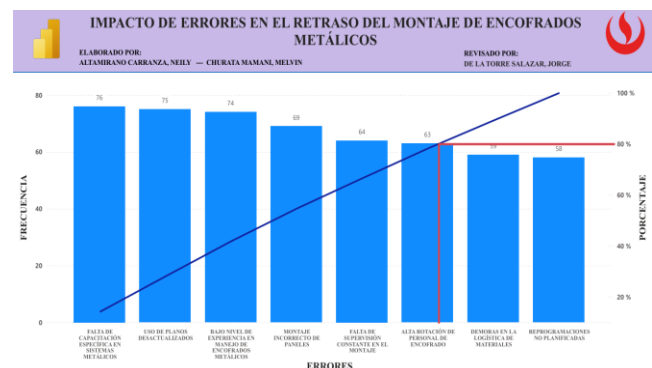


Fig. 9 Dashboard de Power BI de las preguntas N°06 y 09 planteadas en la encuesta de juicio de expertos

Pregunta N°06: Según su experiencia, ¿Qué tan críticos considera los siguientes errores durante el encofrado metálico de elementos verticales?

Pregunta N°09: Con relación al personal de obra, ¿qué tanto afectan los siguientes aspectos al retraso en el montaje del encofrado metálico?

La fig. 9 correspondiente a la pregunta N°05 y N°06 de la encuesta planteada, mediante la herramienta diagrama de Pareto se evidencian los principales errores que ocasionan retrasos en el montaje de encofrados metálicos en edificaciones multifamiliares. Los cinco factores más frecuentes son: falta de capacitación específica, uso de planos desactualizados, limitado uso de tecnologías de planificación, maniobras inseguras y ausencia de control de calidad, concentran aproximadamente el 80 % del total, validando el principio de Pareto. Este resultado indica que dichas deficiencias son las más incidentes y, por tanto, deben ser priorizadas en cualquier estrategia de mejora.

J) Validación de la solución mediante Juicio de expertos

Mediante la herramienta Juicio de Expertos se evaluó la pertinencia y efectividad de la solución propuesta, basada en la automatización del prearmado con BIM, Dynamo y Realidad Aumentada, para optimizar el tiempo de ejecución de encofrados metálicos en elementos verticales. Esta validación permitió determinar su capacidad para mejorar la eficiencia, reducir errores y agilizar el proceso constructivo.

Tabla 6
Validación de solución mediante juicio de expertos

Indicador	Unidad	Meta de aceptación	Propuesta	Validación
Nivel de satisfacción del cliente	Escala Likert	[3-4] [20]	< [4.5]	Cumple

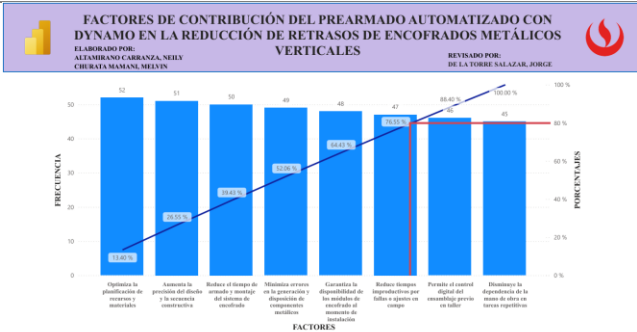


Fig. 10 Dashboard de Power BI de las preguntas N°01 y 02 planteada en la encuesta de juicio de expertos

Pregunta N°01: Según su experiencia, ¿en qué medida considera que la automatización del prearmado con Dynamo contribuye a reducir los retrasos en la ejecución de encofrados metálicos verticales?

Pregunta N°02: Según su experiencia, ¿Qué tan importante considera el prearmado automatizado con Dynamo para evitar retrasos en la ejecución de los encofrados metálicos verticales?

Respecto a las preguntas N°01 y N°02 planteadas en la encuesta. La fig. 10 mediante la herramienta de diagrama de Pareto, muestra que el factor “Optimiza la planificación de recursos y materiales” presenta la mayor incidencia con un 13.40 %, evidenciando la relevancia del uso del prearmado automatizado con Dynamo como estrategia clave para la reducción de retrasos en la ejecución de encofrados metálicos. Aplicando el principio de Pareto, los factores que se encuentran dentro del 80 % de contribución acumulada son: la optimización de la planificación, el aumento de la precisión del diseño y la secuencia constructiva, la reducción del tiempo de armado y la reducción de tiempos improductivos en campo. Estos resultados demuestran que la automatización del prearmado mediante Dynamo contribuye directamente a mejorar la productividad, optimizar recursos y asegurar una ejecución más eficiente del sistema de encofrado metálico vertical.

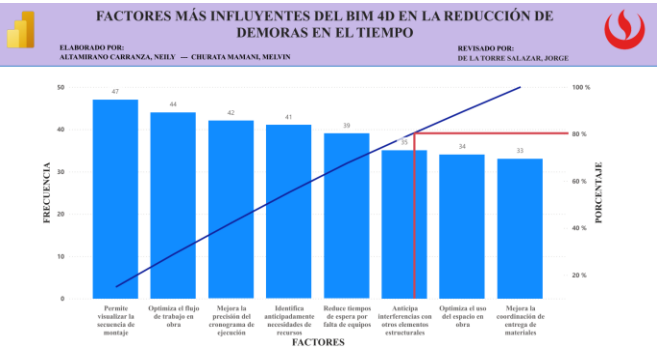


Fig. 11 Dashboard de Power BI de las preguntas N°03 y 09 planteada en la encuesta de juicio de expertos

Pregunta N°03: Según su experiencia, ¿Considera que el uso de BIM 4D mejora la planificación y control del proceso constructivo de encofrados metálicos?

Pregunta N°09: ¿Qué tan efectivo considera el uso de BIM y Dynamo para mejorar la precisión y control del proceso de prearmado de encofrados metálicos?

Respecto a las preguntas N°03 y N°09 planteadas en la encuesta. La fig. 11 mediante la herramienta de diagrama de Pareto, evidencia que el factor “Optimiza la coordinación de actividades dentro del cronograma” tiene la mayor incidencia con un 13.65 %, demostrando que el uso de BIM 4D y Dynamo contribuye directamente a mejorar la precisión y el control del proceso constructivo. Asimismo, los factores que integran el 80 % acumulado, como la anticipación de interferencias, la visualización de la secuencia de montaje, la trazabilidad del avance físico y la reducción de errores dimensionales, evidencian que la integración de estas herramientas favorece la coherencia entre el modelo digital y la ejecución real, garantizando una planificación más eficiente, precisa y coordinada en el montaje de los encofrados metálicos.



Fig. 12 Dashboard de Power BI de las preguntas N°05 y 10 planteada en la encuesta de juicio de expertos

Pregunta N°05: Según su experiencia, ¿Cree que la Realidad Aumentada mejora la precisión y seguridad en el montaje de encofrados metálicos verticales?

Pregunta N°10: ¿En qué grado la implementación de la solución con BIM, Dynamo y Realidad Aumentada contribuye a mejorar la seguridad y la gestión de calidad en obra?

Respecto a las preguntas N°05 y N°10 planteadas en la encuesta. La fig. 12 mediante la herramienta de diagrama de Pareto, evidencia que el factor “Asegura el alineamiento correcto de los elementos” presenta la mayor incidencia con un 13.44 %, resaltando la efectividad de la Realidad Aumentada combinada con BIM y Dynamo en la gestión de calidad y seguridad durante la instalación de encofrados metálicos. Los factores comprendidos dentro del 80 % acumulado, como la reducción de errores humanos, el monitoreo de la secuencia de montaje, las inspecciones visuales en tiempo real y la verificación del progreso en campo, demuestran que la integración de estas tecnologías mejora la precisión en la ejecución, refuerza la supervisión técnica y reduce riesgos asociados al montaje manual, garantizando una instalación más segura y controlada.

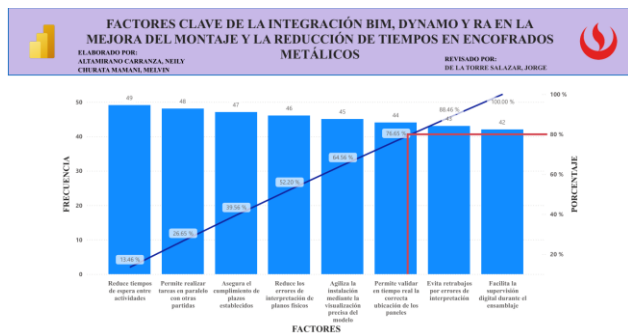


Fig. 13 Dashboard de Power BI de las preguntas N°04 y 07 planteada en la encuesta de juicio de expertos

Pregunta N°04: Según su experiencia, ¿Qué tan útil considera la integración entre BIM, Dynamo y Realidad Aumentada en la optimización del montaje de encofrados metálicos?

Pregunta N°07: Según su experiencia, ¿En qué grado la combinación de BIM, Dynamo y Realidad Aumentada permite

optimizar el tiempo total de ejecución del encofrado metálico vertical?

Respecto a las preguntas N°04 y N°07 planteadas en la encuesta. La fig. 13 mediante la herramienta de diagrama de Pareto, muestra que el factor “Reduce tiempos de espera entre actividades” presenta la mayor incidencia con un 13.46 %, evidenciando que la integración de BIM, Dynamo y Realidad Aumentada permite optimizar la secuencia constructiva y los plazos de ejecución en el montaje de encofrados metálicos. Los factores incluidos dentro del 80 % acumulado, como la realización de tareas en paralelo, la reducción de errores de interpretación, la visualización precisa del modelo y la validación en tiempo real de la ubicación de paneles, demuestran que esta integración tecnológica agiliza la instalación, evita retrabajos y fortalece la supervisión digital, contribuyendo a una ejecución más rápida, coordinada y eficiente.

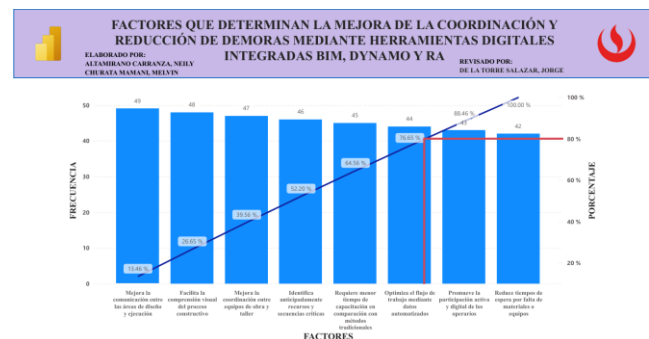


Fig. 14 Dashboard de Power BI de las preguntas N°06 y 08 planteada en la encuesta de juicio de expertos

Pregunta N°06: Según su experiencia, ¿Con qué frecuencia el uso combinado de BIM y Dynamo ha permitido mejorar la coordinación y reducir demoras logísticas en obra?

Pregunta N°08: ¿En qué medida considera que el personal técnico y de obra puede adaptarse al uso de herramientas automatizadas como Dynamo y Realidad Aumentada?

Respecto a las preguntas N°06 y N°08 planteadas en la encuesta. La fig. 14 mediante la herramienta de diagrama de Pareto, evidencia que el factor “Mejora la comunicación entre las áreas de diseño y ejecución” presenta la mayor incidencia con un 15.53 %, destacando la influencia de las herramientas digitales integradas BIM, Dynamo y Realidad Aumentada en la coordinación y reducción de demoras durante la ejecución de encofrados metálicos. Los factores comprendidos dentro del 80 % acumulado, como la comprensión visual del proceso constructivo, la coordinación entre equipos, la optimización del flujo de trabajo mediante datos automatizados y la participación digital de los operarios, confirman que la integración tecnológica fortalece la comunicación, agiliza la planificación y mejora la eficiencia general en la gestión del proyecto

CONCLUSIONES

El juicio de expertos respecto a la problemática evidenció que el 80 % de los retrasos en la partida de encofrados metálicos verticales se originan en factores internos de gestión, como la

falta de coordinación, la capacitación insuficiente y la demora en la entrega de materiales, lo que confirma la necesidad de implementar soluciones que optimicen tanto la planificación como la ejecución en obra.

Asimismo, más del 85 % de los profesionales coincidió en que la integración de Dynamo, BIM y Realidad Aumentada permite reducir los tiempos de armado y montaje en más del 30 %, disminuir errores humanos y mejorar la coordinación entre taller y obra, evidenciando la efectividad de la propuesta desde un enfoque técnico-operativo.

En términos de desempeño, el rendimiento alcanzado fue de 31.875 m²/día, superando en un 79 % al rendimiento tradicional (17.77 m²/día), mientras que la cuantía se redujo de 0.8495 a 0.2519 HH/m², lo que representa una disminución del 70 % en el uso de mano de obra. Asimismo, el índice SPI aumentó de 0.92 a 1.33, evidenciando una ejecución por encima del cronograma proyectado. Estos resultados reflejan un impacto directo en la eficiencia operativa y el control del tiempo en obra.

Desde una perspectiva social, la implementación de la propuesta contribuye a mejorar las condiciones de trabajo del personal en obra, al reducir la carga operativa asociada a tareas repetitivas y minimizar retrabajos derivados de errores en el montaje. Asimismo, el uso de herramientas como la Realidad Aumentada facilita la comprensión del proceso constructivo, reduciendo la dependencia de la experiencia empírica y favoreciendo la capacitación del personal técnico y operario.

En este sentido, la propuesta no solo optimiza indicadores productivos, sino que también fortalece la seguridad, la coordinación y la eficiencia en la ejecución, promoviendo un entorno de trabajo más controlado y alineado con prácticas constructivas sostenibles. Por ello, se concluye que la integración de tecnologías digitales representa una solución viable y escalable para mejorar tanto el desempeño técnico como el desarrollo del capital humano en el sector construcción.

REFERENCIAS

- [1] Ccama H, & Humpiri L. (2024). Vista de Identificación de áreas de mejora para evitar retrasos en proyectos de construcción en Perú. <https://revistas.um.edu.uy/index.php/ingenieria/article/view/1143/1456>
- [2] Quirós-Robles, V. (2016). Análisis de los procesos constructivos en las actividades de chorrea, encofrado y desencofrado de muros y columnas en el proyecto QBO Skyhomes de la empresa H Solís. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/6909>
- [3] Zaiman, A. P., Putra, A. B., Yustanto, K. B., & Arfan, R. (2024). Comparison Analysis for Implementation Time of Column Formwork Using Three Formwork Methods in a Building Project at Bandung Province. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1324(1), 012032. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1324/1/012032>
- [4] Nilimaa, J., Gamil, Y., & Zhaka, V. (2023). Formwork Engineering for Sustainable Concrete Construction. CivilEng, 4(4), 1098–1120. <https://doi.org/10.3390/civileng4040060>
- [5] Cheng, B., et al. (2022). BIM-enabled life cycle assessment of concrete formwork waste reduction through prefabrication. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 53, 102449. <https://doi.org/10.1016/J.SETA.2022.102449>
- [6] Hao, J. et al. (2024). Catalyzing sustainability through prefabrication: Integrating BIM-LCA for assessing embodied carbon in timber formwork waste. Sustainable Chemistry and Pharmacy, 41, 101698. <https://doi.org/10.1016/J.SCP.2024.101698>
- [7] Iqbal, F., et al. (2024). BIM-IoT integration for remote real-time concrete compressive strength monitoring. Ain Shams Engineering Journal, 15(7), 102863. <https://doi.org/10.1016/J.ASEJ.2024.102863>
- [8] Lawdy, M. et al. (2024). On the methodology of conventional and semi-system formwork project comparison. MethodsX, 13, 102824. <https://doi.org/10.1016/J.MEX.2024.102824>
- [9] Baskova, R., et al. (2023). A Dynamic Model for Effective and Optimal Planning of Formwork in Construction Projects. Buildings, 13(7). <https://doi.org/10.3390/buildings13071794>
- [10] Alejos, L., & Medrano, L. (2023). Proceso para la Mejora de la Productividad de Obra en la Etapa de Cimentación en Edificaciones Multifamiliares en Lima a través del Uso de la Realidad Aumentada [Tesis, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. <http://hdl.handle.net/10757/671769>
- [11] Wu, S., Hou, L., Chen, H., Zhang, G. (Kevin), Zou, Y., & Tushar, Q. (2023). Cognitive ergonomics-based Augmented Reality application for construction performance. Automation in Construction, 149, 104802. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2023.104802>
- [12] Pan, N. H., & Isnaeni, N. N. (2024). Integration of Augmented Reality and Building Information Modeling for Enhanced Construction Inspection—A Case Study. Buildings 2024, Vol. 14, Page 612, 14(3), 612. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS14030612>
- [13] Lawdy, M. et al. (2024). On the methodology of conventional and semi-system formwork project comparison. MethodsX, 13, 102824. <https://doi.org/10.1016/J.MEX.2024.102824>
- [14] Wang, Q., Yang, D., & Chen, D. (2023). Study on the Mechanical Properties of MiC Formworks with Different Material Components. Buildings, 13(12). <https://doi.org/10.3390/buildings13122977>
- [15] Monjaras Bottger, D. A. (2018). Uso de Dynamo para Revit en la mejora de la gestión de información y modelado en un hotel [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. <https://pdfcoffee.com/uso-de-dynamo-para-revit-en-la-mejora-de-la-pdf-pdf-free.html>
- [16] Kolbeck, L., et al. (2023). Modularisation Strategies for Individualised Precast Construction—Conceptual Fundamentals and Research Directions. Designs 2023, Vol. 7, Page 143, 7(6), 143. <https://doi.org/10.3390/DESIGNS7060143>
- [17] Iqbal, F., et al. (2024). BIM-IoT integration for remote real-time concrete compressive strength monitoring. Ain Shams Engineering Journal, 15(7), 102863. <https://doi.org/10.1016/J.ASEJ.2024.102863>
- [18] Pan, N. H., & Isnaeni, N. N. (2024). Integration of Augmented Reality and Building Information Modeling for Enhanced Construction Inspection—A Case Study. Buildings 2024, Vol. 14, Page 612, 14(3), 612. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS14030612>
- [19] Fazel, A., & Adel, A. (2024). Enhancing construction accuracy, productivity, and safety with augmented reality for timber fastening. Automation in Construction, 166, 105596. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2024.105596>
- [20] Escobar, J., & Cuervo, Á. (2008). VALIDEZ DE CONTENIDO Y JUICIO DE EXPERTOS: UNA APROXIMACIÓN A SU UTILIZACIÓN (Vol. 6).
- [21] De La Lama Wallin, M. E., & Donayre Angulo, W. I. (2023). Análisis comparativo de encofrado metálico y encofrado de aluminio en elementos verticales para determinar cuál es el más eficiente en tiempo en viviendas multifamiliares en Lima – Perú. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC). <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/670953>
- [22] Nina, J. (2021). Análisis y evaluación de la productividad en la partida de encofrado en obras de construcción de edificaciones privadas ubicadas en la ciudad de Arequipa. Universidad Católica de Santa María. <https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/10859>
- [23] Panchal, P. B. (2023). The role of advanced earned value management (EVM) metrics in schedule performance analysis of building projects. <https://Wjaets.Com/Sites/Default/Files/WJAETS-2023-0194.Pdf>, 9(2), 391–405. <https://doi.org/10.30574/WJAETS.2023.9.2.0194>