

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**ADOPCIÓN DE *VIRTUAL, DESIGN AND CONSTRUCTION* PARA MEJORAR LA  
IMPLEMENTACIÓN DE *LEAN CONSTRUCTION* EN UN PROYECTO DE  
EDIFICACIÓN MULTIFAMILIAR**

**Tesis para obtener el título profesional de Ingeniera Civil**

**AUTORA:**

Naysha Verónica Montenegro Rios

**Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Civil**

**AUTOR:**

Gonzalo Wilder Loayza Torres

**ASESOR:**

Ph. D. Xavier Max Brioso Lescano

Lima, Abril, 2024

### Informe de Similitud

Yo, XAVIER MAX BRIOSO LESCANO, docente de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de la tesis titulada ADOPCIÓN DE VIRTUAL, DESIGN AND CONSTRUCTION PARA MEJORAR LA IMPLEMENTACIÓN DE LEAN CONSTRUCTION EN UN PROYECTO DE EDIFICACIÓN MULTIFAMILIAR, de los autores:


MONTENEGRO RIOS NAYSHA VERONICA,

LOAYZA TORRES GONZALO WILDER,

dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 20%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 19/06/2024.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: Lima, 19 de junio del 2024

Apellidos y nombres del asesor: Brioso Lescano Xavier Max	
DNI: 09856898	Firma 
ORCID: 0000-0002-0174-0241	

## Resumen

En la actualidad, los equipos de proyectos enfrentan un entorno laboral caracterizado por cambios tecnológicos constantes y plazos de entrega ajustados. Además, la presencia de desperdicios en la construcción es una constante. Por lo tanto, las empresas constructoras buscan eficiencia en sus proyectos, cumpliendo con plazos, costos y calidad, mientras previenen o reducen los desperdicios a través de una gestión adecuada. Sin embargo, muchas pequeñas y medianas empresas en el mercado peruano desconocen o se resisten a la adopción de nuevas metodologías colaborativas debido a la falta de información y la reticencia a invertir en actualizaciones y/o investigación. La falta de flexibilidad en los planes, la escasa colaboración entre los involucrados, la baja participación de los trabajadores en la planificación y la ausencia de indicadores centrados en los procesos son barreras adicionales para la evolución de la industria. En la era de la transformación digital, es crucial contar con un marco de integración de metodologías colaborativas que faciliten la migración de un entorno tradicional hacia uno donde se apliquen nuevas herramientas y tecnologías, fomentando la colaboración y participación de todos los trabajadores para mantener la competitividad, innovación y aumentar las ganancias de la empresa en el sector de la construcción.

Por lo tanto, la presente tesis propone una metodología de integración basada en la adopción del Virtual, Design and Construction (VDC) en un proyecto de edificación multifamiliar para potenciar la implementación del Last Planner System (LPS), una de las herramientas más conocidas de planificación y control de proyectos de la filosofía Lean Construction (LC). En particular, se ha optado por integrar dichas metodologías debido a la fuerte sinergia positiva, validada por múltiples autores especialistas en la materia, entre las funcionalidades del VDC y los principios del LC, así como también, debido a los múltiples

beneficios que ofrecen en cuanto a la optimización de los costos, tiempo, recursos y calidad de los proyectos.

El alcance del desarrollo de la propuesta se limita a la integración de las herramientas y funcionalidades de las componentes de producto y proceso de la metodología del VDC durante la planificación sugerida por el Last Planner System (LPS) para la ejecución de la fase de subestructuras del proyecto multifamiliar. Entonces, a partir de lo señalado, la metodología propuesta consiste en definir los objetivos del proyecto y el cliente, recolectar información respecto al estado inicial del proyecto (previo a la ejecución de la propuesta), elaborar modelos 3D y 4D del proyecto, usar dichos modelos y la información proporcionada por estos durante las reuniones colaborativas de planificación semanal y diaria para lograr mejorar la coordinación de las actividades y procesos. Asimismo, se extraerán métricas de carácter cualitativo y cuantitativo durante la puesta en marcha de la propuesta con la finalidad de tener una base sólida que permita comparar, discutir, validar y cuantificar los resultados positivos de la integración de VDC al LPS durante la ejecución del proyecto multifamiliar.

## Agradecimientos

*"A mis padres Clelia y Pedro, quienes han sido mi mayor inspiración, por su amor y apoyo incondicional, paciencia y sacrificio para que pudiera llegar a cumplir mis metas. Gracias a ambos por darme una educación de calidad y consejos que han contribuido a mi crecimiento personal y profesional. Sé lo orgullosos que están de mí y de este gran logro."*

*"A mi abuelita Creselpina y a mi familia, fuente inagotable de amor, cariño, soporte y comprensión. Gracias por estar siempre pendiente de mí a pesar de la distancia. Gracias por motivarme a seguir adelante y por ser mi refugio en los momentos difíciles."*

**Naysha Montenegro**

*"Antes que todo, expreso mi agradecimiento a Dios y sus jerarquías por haberme brindado esta hermosa oportunidad y darme la fuerza necesaria para afrontar el día a día con esperanza."*

*"Quiero extender mi profundo agradecimiento a quienes hicieron posible este sueño: a mis padres Wilder y Olinda que forjaron su familia y nunca dejaron de luchar por que sus hijos tengan las oportunidades necesarias para convertirse en personas que buscan superarse a sí mismo día tras día. A ellos mi eterno agradecimiento."*

*"De la misma forma, agradezco a mi enamorada Gabriely por estar en todo momento como pilar fundamental en mi vida durante todo este tiempo."*

*"Finalmente, a todas las personas que han pasado por mi vida y han dejado un fragmento de enseñanza que me ayudo a ser la persona de hoy. Muchas gracias, ¡Paz Inverencial!"*

**Gonzalo Loayza**

*"A nuestro asesor el Ph.D. Xavier Brioso, por su vocación de enseñanza, el conocimiento, el tiempo, la paciencia y la ayuda brindada durante el desarrollo de la presente tesis."*

## Índice

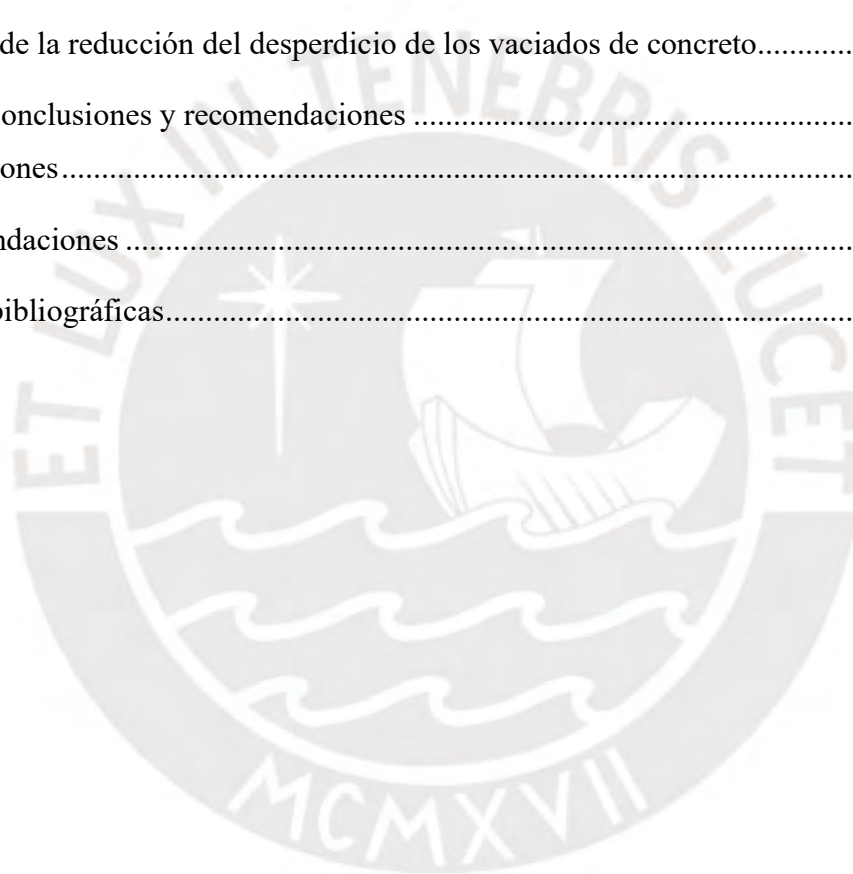
Índice de figuras.....	IX
Índice de tablas .....	XI
Capítulo 1. Introducción .....	1
1.1 Preguntas de investigación.....	4
1.1.1 Pregunta general.....	4
1.1.2 Preguntas específicas.....	4
1.2 Justificación .....	4
1.3 Objetivos.....	6
1.3.1 Objetivo general .....	6
1.3.2 Objetivos específicos.....	6
1.4 Método de la investigación.....	7
1.5 Alcance y limitaciones del desarrollo de la propuesta.....	8
Capítulo 2. Marco teórico .....	9
2.1 <i>Lean Construction</i> (LC): filosofía de trabajo y sistema de producción.....	9
2.1.1 <i>Last Planner System</i> (LPS): sistema de control de la producción de proyectos .....	11
2.1.2 Niveles de planificación LPS .....	14
2.2 <i>Virtual Design and Construction</i> (VDC) como herramienta catalizadora del sistema de producción <i>Lean Construction</i> .....	18
2.2.1 <i>Building Information Model</i> (BIM): modelo virtual fiable para la toma de decisiones .....	19
2.2.2 <i>Project Production Management</i> (PPM): Gestión de la Producción del Proyecto .	20
2.2.3 <i>Integrated Concurrent Engineering</i> (ICE): Ingeniería Concurrente Integrada como método para facilitar decisiones y mejorar la comunicación .....	21
2.3 Sinergia entre <i>Virtual Design and Construction</i> y <i>Lean Construction</i> .....	22
Capítulo 3. Metodología de integración: <i>Virtual Design and Construction</i> como complemento de la implementación del <i>Last Planner System</i> .....	26
3.1 Definir objetivos del proyecto .....	27

3.2	Recolección de información .....	28
3.2.1	Investigación cualitativa.....	28
3.2.1.1	Entrevista semiestructurada .....	29
3.2.1.2	<i>Plus / Delta</i> .....	32
3.2.2	Medición de indicadores cuantitativos .....	34
3.2.2.1	Porcentaje de plan completado (PPC).....	34
3.2.2.2	Cantidad de Request for information (RFI).....	35
3.3	Elaboración de modelos.....	36
3.3.1	Modelado 3D.....	36
3.3.1.1	Criterios de modelado .....	36
3.3.2	Modelado 4D.....	37
3.4	Estructuración del trabajo .....	38
3.5	Elaboración del <i>Lookahead</i> .....	38
3.5.1	Análisis de restricciones.....	38
3.5.2	Detección de interferencias .....	39
3.6	Planificación semanal .....	39
3.6.1	Planificación de reuniones colaborativas .....	40
3.7	Programación diaria.....	40
3.8	Monitoreo y control de métricas .....	41
3.8.1	Plus/Delta .....	41
3.8.2	Porcentaje de plan completado (PPC).....	41
3.8.3	Registro de la productividad (RUP).....	41
3.8.4	Cantidad de <i>Request for information</i> (RFI).....	42
3.8.5	Número de interferencias detectadas.....	43
3.8.6	Metrados.....	43

3.8.6.1	Tiempo para ejecutar los metrados .....	44
3.8.6.2	Verificar la exactitud de los metrados .....	45
3.8.7	Medición del desperdicio de concreto .....	45
3.9	Documentar aprendizaje .....	45
Capítulo 4.	Caso de estudio .....	46
4.1	Descripción del proyecto multifamiliar .....	46
4.2	Recolección de datos .....	48
4.2.1	Primera etapa .....	48
4.2.1.1	Entrevista semiestructurada .....	48
4.2.1.2	Planificación semanal .....	50
4.2.1.3	Porcentaje de plan completado .....	53
4.2.1.4	Cantidad de solicitudes de información (RFI's) .....	53
4.2.1.5	Objetivos del proyecto .....	55
4.2.2	Segunda etapa .....	56
4.2.2.1	Modelo 3D .....	56
4.2.2.2	Modelado 4D .....	60
4.2.2.3	Estructuración del trabajo .....	62
4.2.2.4	Programación semanal .....	64
4.2.2.4.1	Análisis de restricciones .....	67
4.2.2.4.2	Evaluación de reuniones .....	68
4.2.2.5	Monitoreo y control de indicadores .....	71
4.2.2.5.1	Porcentaje de plan completado (PPC).....	71
4.2.2.5.2	Ratio unitario de productividad (RUP).....	73
4.2.2.5.3	Cantidad de solicitudes de información (RFI' s).....	75
4.2.2.5.4	Número de interferencias detectadas (BIM) .....	77
4.2.2.5.5	Reducción del tiempo para ejecutar los metrados.....	78



4.2.2.5.6 Medición del desperdicio de concreto .....	80
Capítulo 5. Análisis y discusión de resultados.....	81
5.1 Análisis del porcentaje de plan completado (PPC).....	81
5.2 Análisis de productividad de mano de obra.....	83
5.3 Interacción de RUP versus PPC.....	86
5.4 Análisis de la cantidad de las solicitudes de información (RFI).....	88
5.5 Tiempo y precisión para ejecutar metrados. ....	89
5.6 Análisis de la reducción del desperdicio de los vaciados de concreto.....	92
Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones .....	95
6.1 Conclusiones.....	95
6.2 Recomendaciones .....	98
Referencias bibliográficas.....	99



## Índice de figuras

<b>Figura 1.</b> Diagrama de flujo del método de investigación.....	7
<b>Figura 2.</b> Niveles de planeamiento. ....	14
<b>Figura 3.</b> Esquema de integración de fases LPS.....	15
<b>Figura 4.</b> Diagrama de flujo de la metodología propuesta.....	26
<b>Figura 5.</b> Formulario <i>Plus/Delta</i> . ....	33
<b>Figura 6.</b> Ejemplo de la información brindada por el complemento “ <i>Dynamic Quantities V.3.5.0</i> ”.....	44
<b>Figura 7.</b> Carátula del folleto de venta del proyecto.....	46
<b>Figura 8.</b> Extracto de la transcripción de la entrevista realizada. ....	49
<b>Figura 9.</b> Formulario <i>Plus/Delta</i> extraído de la semana 14 de la obra.....	50
<b>Figura 10.</b> Análisis de restricciones.....	52
<b>Figura 11.</b> Resumen de la planificación de la siguiente semana.....	52
<b>Figura 12.</b> Modelo 3D de la especialidad de estructuras.....	57
<b>Figura 13.</b> Modelo 3D diferenciado según el tipo de concreto.....	58
<b>Figura 14.</b> Modelo electromecánico de la subestructura.....	58
<b>Figura 15.</b> Modelo 3D de la especialidad de instalaciones sanitarias.....	59
<b>Figura 16.</b> Modelo 3D del acero de refuerzo.....	60
<b>Figura 17.</b> Diagrama de Gantt para la secuencia de actividades del anillo 3.....	61
<b>Figura 18.</b> Conjuntos creados para enlazar los elementos gráficos con la secuencia establecida en el cronograma.....	61
<b>Figura 19.</b> Secuencia de la construcción de los elementos del anillo 3 y de la excavación de las cisternas adaptado al proyecto LIRI. ....	62
<b>Figura 20.</b> Vista 3D de la planificación semanal de los muros anclados del 2do anillo.....	65
<b>Figura 21.</b> <i>Lookahead</i> de la semana 27, 28 y 29.....	66
<b>Figura 22.</b> Registro de restricciones.....	67
<b>Figura 23.</b> Formulario <i>Plus/Delta</i> extraído de la semana 21 de la obra.....	68
<b>Figura 24.</b> Resultados de la encuesta realizada para validar sinergia entre las funcionalidades de VDC y los principios de LC.....	70
<b>Figura 25.</b> Actividades completadas y no completadas de la semana 20. ....	73
<b>Figura 26.</b> Ejemplo de formato para el tareo diario.....	74
<b>Figura 27.</b> Formato implementado para determinar el RUP.....	75
<b>Figura 28.</b> Interferencias más recurrentes.....	78
<b>Figura 29.</b> Plano adaptado para el ensayo desarrollado.....	79
<b>Figura 30.</b> Formato brindado a cada participante.....	79
<b>Figura 31.</b> Gráfico del PPC del proyecto.....	82
<b>Figura 32.</b> RUP de mano de obra de la partida de carpintería de los muros de los 3 anillos .	83
Fuente: Elaboración propia.....	83
<b>Figura 33.</b> Ratio de mano de obra de la partida de carpintería de las losas macizas de los sótanos.....	85
<b>Figura 34.</b> Modelo 3D de la sectorización de losas macizas – Sótano 3.....	86
<b>Figura 35.</b> Gráfico de PPC versus RUP de mano de obra de la partida de encofrado relacionada a los muros anclados.....	87
<b>Figura 36.</b> Gráfico de PPC versus RUP de mano de obra de la partida de encofrado relacionada a las losas macizas.....	87
<b>Figura 37.</b> Resumen de los resultados del rol del uso del modelo en la detección de RFI’s y mejoramiento del entendimiento de estos.....	89
<b>Figura 38.</b> Resumen gráfico de la variación del metrado y tiempo invertido obtenido por ambos	

métodos .....	90
<b>Figura 39.</b> Histograma de volumen de concreto por piso y promedio de desperdicio – Proyecto Liri.....	92
<b>Figura 40.</b> Histograma de volumen de concreto por piso y promedio de desperdicio – Proyecto Pinos 3.....	93
<b>Figura 41.</b> Resumen comparativo de porcentajes de desperdicio de concreto entre ambos proyectos.....	94



**Índice de tablas**

**Tabla 1.** Principales componentes considerados en el Plan Maestro..... 15

**Tabla 2.** Principales restricciones por identificar en el *Lookahead* ..... 16

**Tabla 3.** Frecuencia de las interacciones entre los principios de *Lean Construction* y las funcionalidades VDC.....24

**Tabla 4.** Correspondencia entre las preguntas de investigación con los objetivos planteados para la recolección de la información cualitativa. .... 30

**Tabla 5.** Personas que desempeñan la función de últimos planificadores dentro del proyecto de construcción. .... 32

**Tabla 6.** Desglose de la información referente a los RFI's ..... 54

**Tabla 7.** Detalle general de las principales actividades desarrolladas durante las semanas de estudio ..... 72

**Tabla 8.** Desglose de información referente a los RFI's de la segunda etapa..... 76

**Tabla 9.** Valores base para comparar el metrado y tiempo invertido en este proceso ..... 80

**Tabla 10.** Resultados del PPC obtenido desde la semana 2 hasta la 32..... 81

**Tabla 11.** Resumen de los resultados de 2 participantes en el ensayo desarrollado ..... 89

**Tabla 12.** Resumen de los resultados ..... 91



## Capítulo 1. Introducción

En la actualidad, las tendencias mundiales propias de la Industria 4.0 o Cuarta Revolución Industrial son los procesos de automatización y avances tecnológicos (Barco, 2018), los cuales están en constante evolución e impactan a todos los sectores. No hay duda de que la construcción 4.0 tendrá un efecto profundo en la industria AEC (Arquitectura, Ingeniería y Construcción) y se tornará en una oportunidad ventajosa para las empresas del sector AEC, ya que se basa esencialmente en la digitalización y la automatización de la industria para optimizar los procesos constructivos (García, Agustí, Joss & Hunhevicz, 2019; Tuesta et al., 2022). Esta predisposición al cambio se ha hecho más notoria en el contexto provocado por el COVID - 19 durante el cual pequeñas y grandes empresas se han visto en la necesidad de migrar hacia el uso de entornos colaborativos y sistemas de gestión de información (MIS por sus siglas en inglés) con la finalidad de afrontar los nuevos desafíos, optimizar la gerencia de sus proyectos, mantener la competitividad en sus respectivos mercados y cumplir con las medidas sanitarias impuestas por las entidades responsables de estas durante ese periodo. La pandemia no sólo consiguió detener la ejecución de muchos proyectos; sino también cancelar grandes eventos del sector; sin embargo, esta coyuntura ha tenido un impacto secundario positivo: el impulso de la digitalización (Jackson & Hertzman, 2020).

La oficina de estadísticas del trabajo del Departamento Americano de Comercio ha realizado un estudio comparativo sobre la productividad laboral entre la industria de la construcción de EE. UU. y todas las demás industrias no agrícolas durante los años 1964 y 2003 (Pons, 2014). En dicho estudio, se señala que “el índice de productividad de la construcción descendió casi un 25%,

mientras que la productividad en el resto de la industria no agrícola se incrementó en casi un 200%” (Pons, 2014, pp. 12). Las constantes bajas tasas de crecimiento en productividad e innovación de la industria de la construcción se deben a la falta de avances, a la fragmentación de la industria y a las características propias de la construcción (Del Savio et al., 2022). Del mismo modo, el Construction Industry Institute y el Lean Construction Institute realizaron otra indagación, la cual indica que todo el esfuerzo realizado y el material invertido en el 57% del tiempo total de la ejecución de los proyectos no añaden valor al producto final, mientras que en la industria manufacturera esta cifra era solo del 26%. Al respecto, se conocen los problemas típicos del modelo tradicional de gestión de proyectos que influyen en dichos resultados siendo principalmente los siguientes: incompatibilidad de información, falta de coordinación entre los involucrados, baja productividad comparada con otras industrias y errores durante el desarrollo de proyecto los cuales generan retrabajos (Pons, 2014). Además, la gestión tradicional genera cantidades considerables de desperdicios durante el proceso por el hecho de que esta se centra únicamente en la ejecución sin considerar el flujo continuo de los procesos y operaciones asociados (Koskela, 2000).

Como solución a dichas problemáticas, el sector construcción cuenta con diferentes metodologías y tecnologías de trabajo emergentes que implican colaboración y digitalización para la gestión de proyectos (Majumdar et al., 2022), los cuales se han ido desarrollando a lo largo de los años. Entre ellas, se destaca el Diseño y Construcción Virtual (VDC por sus siglas en inglés) cuya aplicación previa en una serie de casos de estudio ha sido muy ventajosa por el hecho de que ha permitido optimizar los costos, tiempo, recursos y calidad de los proyectos (Del Savio et al., 2022). Entonces, el VDC es una metodología orientada a la gestión colaborativa de proyectos de construcción y parte de los principios de la matriz POP (producto, organización y proceso) (Del

Savio, 2021). Asimismo, el VDC se basa en el uso de modelos multidisciplinarios en proyectos de diseño y construcción, enfocados en la producción, los cuales incluyen el producto (la edificación modelada), la organización del equipo de diseño, construcción y operación, y los procesos de trabajo con la finalidad de respaldar los objetivos comerciales del cliente (Fischer et al., 2004). El VDC está soportado por 3 pilares, los cuales serán señalados posteriormente en el ítem 2.2., siendo uno de ellos el *Building Information Model* (BIM), el cual permite validar las relaciones espaciales de los componentes del proyecto mediante simulaciones y prototipos (Rischmoller, Reed, Khanzode & Fischer, 2018). Asimismo, otra metodología muy útil es el sistema de producción *Lean Construction* basado en la filosofía de construcción sin pérdidas introducido por el profesor Lauri Koskela en 1992 (Porras, Sánchez & Galvis, 2014), a partir del cual se han desarrollado numerosas herramientas destacándose el *Last Planner System*.

A lo largo del desarrollo de la presente tesis, se abordará a mayor profundidad los temas mencionados en los párrafos anteriores. En primer lugar, a lo largo del presente capítulo se expondrá la justificación de la investigación y los objetivos que se pretenden alcanzar. Seguidamente, en el capítulo 2, se presentará el marco teórico en cuanto al Diseño y Construcción Virtual (VDC) como herramienta catalizadora del sistema de producción *Lean Construction*. Luego, en el capítulo 3, se detalla la metodología y en el capítulo 4, se da a conocer el caso de estudio. Consiguientemente, en el capítulo 5, se expondrán los resultados y la discusión de estos. Finalmente, en el capítulo 6, se formularán las conclusiones y recomendaciones producto de la investigación.

## **1.1 Preguntas de investigación**

### **1.1.1 Pregunta general**

¿Qué combinación de herramientas y técnicas de gestión de proyectos de construcción de viviendas multifamiliares podrían ser las más eficientes en la época de la transformación digital para mejorar la producción en obra y satisfacer los requerimientos del cliente?

### **1.1.2 Preguntas específicas**

- ¿La gestión de proyectos de las pequeñas y medianas empresas les está dando resultados positivos y satisfactorios o se necesita a la brevedad una mejora?
- ¿Cuál es la diferencia entre los indicadores de desempeño extraídos a partir de dos escenarios distintos: uno donde el proyecto hace uso de herramientas colaborativas versus otro donde no las aplica?
- ¿Cómo se desarrolla la programación de las actividades en las empresas constructoras en los últimos años durante la etapa de construcción?

## **1.2 Justificación**

En la actualidad, los equipos de proyectos laboran en un entorno cambiante, por los constantes avances de la tecnología, y agitado, por el recorte de los plazos de entrega de los entregables. Además de ello, los desperdicios siempre están presentes en la construcción (Arbulu y Tommelein, 2002). Por ello, las empresas constructoras necesitan que sus



proyectos sean eficientes; es decir, se realicen cumpliendo la triple restricción: plazo establecido, costo presupuestado y calidad solicitada, así como también que los costos generados debido a los desperdicios se prevengan o al menos se disminuyan a través de una formación adecuada, una gestión eficiente, entre otras medidas (Koskela, Ballard & Bolviken, 2023). Sin embargo, existen pequeñas y medianas empresas dentro del mercado peruano que desconocen o se resisten a la aplicación de nuevas metodologías colaborativas que les permita satisfacer lo antes mencionado e identificar las problemáticas del proyecto para plantear una nueva estrategia de gestión beneficiosa para la empresa y el cliente. Esa resistencia se debe a la escasa difusión de la información referente al desarrollo de estas metodologías dentro del sector y al poco interés por invertir en lo necesario para estar a la vanguardia como las grandes empresas. Según Kim y Ballard (2010), las diversas investigaciones llevadas a cabo han demostrado que la falta de flexibilidad en los planes, la nula colaboración entre los involucrados, la baja intervención de los trabajadores en la planificación y el déficit de indicadores centrados en los procesos son barreras que dificultan que los equipos de proyecto aprovechen las ventajas de una planificación continua para enfrentar la incertidumbre y la variabilidad.

En contraste, existen en el mercado empresas constructoras que se han atrevido al cambio, lo cual las ha llevado a ganar competitividad y mayor participación en el mercado. Frente a ello, en la época de la transformación digital, es necesario contar con un marco de integración de metodologías colaborativas que impulsen la migración de las empresas constructoras de su situación actual hacia el uso de nuevas herramientas y tecnologías que les permitan adaptarse al cambio que viene experimentando el sector construcción a nivel

mundial mediante la colaboración y participación de todos sus trabajadores con la finalidad de seguir siendo competitivos, innovadores e incrementar sus ganancias.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo general**

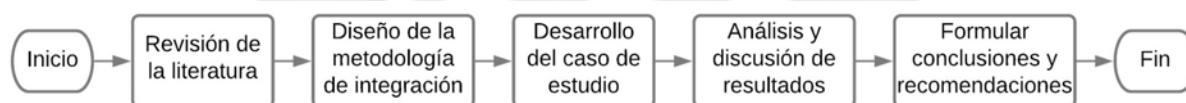
Realizar una propuesta de integración de las herramientas de la metodología *Virtual Design and Construction* (VDC) al *Last Planner System* (LPS) como soporte para el cumplimiento de los principios de la filosofía *Lean Construction* en un proyecto de edificación multifamiliar.

#### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Elaborar modelos virtuales 3D y 4D a partir de los planos en CAD e implementar dichos modelos en las reuniones colaborativas de planificación semanal.
- Aplicar la metodología propuesta en la construcción de la fase de subestructuras de un caso de estudio en la ciudad de Lima para cumplir con los objetivos y requerimientos del cliente.
- Medir y analizar indicadores cualitativos y cuantitativos relacionados al VDC y LPS durante la implementación de la metodología propuesta.
- Analizar el impacto de la metodología propuesta en la reducción de los desperdicios de concreto producidos durante el vaciado.

## 1.4 Método de la investigación

El proyecto de investigación y adopción de VDC se llevará a cabo siguiendo un orden secuencial y estructurado de manera que se logre cumplir con cada uno de los objetivos propuestos. En primer lugar, se buscó información relacionada a la situación actual de la industria de la construcción respecto a la implementación simultánea o paulatina del método *Lean Project Delivery System* (LPDS) o de la herramienta *Last Planner System* (LPS), ambos basados en la filosofía *Lean Construction* (LC), con *Virtual Design and Construction* (VDC) o con *Building Information Modeling* (BIM) en proyectos nacionales e internacionales con la finalidad de conocer los beneficios y desafíos de haber sido aplicado en estos. Luego, a partir de lo hallado en la revisión de literatura, se propuso una metodología que integra el marco VDC a LPS como complemento para potenciar la programación y control de la producción. Después, se ejecutó dicha metodología en el caso de estudio presentado. Seguidamente, se analizaron y discutieron los resultados obtenidos previos a la aplicación de VDC y a lo largo de su puesta en marcha. Finalmente, se elaboraron las conclusiones y recomendaciones respectivas.



**Figura 1.** Diagrama de flujo del método de investigación

Fuente: Elaboración propia.

## 1.5 Alcance y limitaciones del desarrollo de la propuesta

El alcance del desarrollo de la propuesta se limita a la integración de las herramientas y funcionalidades de las componentes de producto y proceso de la metodología del VDC durante la planificación sugerida por el *Last Planner System (LPS)*. Para ello, el estudio comprende el uso del *Building Information Model (BIM)* para la producción del modelo virtual 3D que representa de manera física el producto (proyecto). Asimismo, se incluye el modelamiento de procesos mediante la creación de modelos 4D diseñados en coordinación con lo programado en las reuniones de LPS. Cabe mencionar que, la empresa ya viene implementando el LPS, pero a menor escala y de manera limitada. A partir de ello, se propondrá la integración de ambas herramientas mediante una serie de pasos y, también, se evaluará el desempeño obtenido mediante métricas. El proyecto en el que se trabajará es un edificio multifamiliar de diecisiete pisos y tres sótanos. La propuesta se pondrá en marcha durante la fase de ejecución de la subestructura.

Dentro de las limitaciones, se encontró que la empresa no prioriza la migración de su entorno de trabajo hacia uno tecnológico. Ello se vio reflejado en la escasa inversión que designa a la compra de licencias de softwares como Revit y Navisworks, y a la implementación de hardwares necesarios para potenciar la gestión visual y desarrollo de modelos tales como proyectores multimedia y computadoras que cuenten con las características adecuadas para el desarrollo de modelos BIM.

## Capítulo 2. Marco teórico

En los últimos años, múltiples industrias han logrado avances significativos en las mejoras de su productividad debido al uso de tecnologías de información y al replanteamiento de sus procesos. Ante ello, el sector construcción a pesar de considerarse como una de las industrias con mayor resistencia al cambio (Mandujano, Alarcón, Kunz & Mourgues, 2015) se ha visto obligado a adoptar e integrar, en sus fases y procesos, principios y técnicas emergentes, así como también herramientas tecnológicas para poder mejorar el rendimiento de sus proyectos con la finalidad de incrementar el valor añadido de sus productos (Franz & Messner, 2019).

Existen diferentes alternativas entre las cuales se destaca la sinergia entre el enfoque del *Virtual Design and Construction* (VDC) y el sistema de producción *Lean Construction*, ya que permite al sector enfrentar diferentes desafíos al mismo tiempo que incrementa el rendimiento del proyecto y optimiza sus procesos (Alarcón et al., 2013; Mandujano et al., 2015; Rischmoller et al., 2018). Mencionado esto, a continuación, se presentará cada uno de estos conceptos a mayor detalle.

### 2.1 *Lean Construction* (LC): filosofía de trabajo y sistema de producción

Según Bravo et al. (2019), la construcción, a pesar de su gran importancia, tiene un gran porcentaje de actividades que no agregan valor al proceso, lo cual conlleva a una significativa reducción de la productividad, por lo que es de suma importancia la implementación de técnicas y herramientas de optimización. Ante esta problemática, el Grupo Internacional del *Lean Construction* (IGLC) ha venido investigando la aplicación de técnicas *Lean* en la industria de la construcción, las cuales han generado resultados

satisfactorios en la gestión y ejecución de los proyectos (Salem, Solomon, Genaidy & Minkarah, 2006).

La filosofía *Lean Construction* tiene sus orígenes en *Lean Manufacturing*. Esta metodología fue desarrollada por Kiichiro Toyoda, quien fundó Toyota Motor Corporation en 1930, con la finalidad de optimizar los procesos de producción de los automóviles que fabricaba su corporación (Araujo, 2020). Toyoda, quien aplicó dicha filosofía, logró incrementar la eficiencia de sus procesos utilizando menos recursos (Vargas, Muratalla & Jiménez, 2016).

En el año 1992, el profesor Lauri Koskela introduce *Lean Construction* (LC) o “construcción sin pérdidas” como un nuevo enfoque de *Lean Manufacturing*, pero orientado hacia el sector construcción (Koskela, 1992), debido a que las prácticas y teorías de la producción *Lean* no se ajustaban por completo a dicho sector (Salem et al., 2006). LC debe concebirse “como un pensamiento dirigido a la creación de herramientas que generen valor a las actividades, fases y etapas de los proyectos de construcción” (Porrás, Sánchez & Galvis, 2014, pp. 32). Asimismo, el LC es pieza clave de una adecuada gestión, ya que los métodos que propone permiten identificar pérdidas y/o desperdicios, los cuales posteriormente se eliminan con una serie de herramientas y principios proporcionados por este (Mandujano et al., 2015). Además, es importante recalcar que desde la aparición de esta filosofía se han originado numerosas investigaciones, instrumentos y métodos, los cuales permiten incrementar nuestro conocimiento acerca de cómo impulsar la mejora (Elfving & Seppänen, 2022).

*Lean Construction* ofrece múltiples herramientas para la gestión de personas, recursos y metas, pero para el objetivo de esta investigación, se abordará el *Last Planner System* (LPS). Los resultados de múltiples investigaciones de casos de estudio realizadas por expertos en la materia demuestran que su implementación mejora la planificación de la obra, incrementa los índices de productividad (Alarcón, Diethelm, Rojo & Calderón, 2005; Salem et al., 2006) e impulsa la mejora continua mediante lecciones aprendidas. Por un lado, el LPS es muy compatible con una de las aplicaciones del VDC que se presentará posteriormente en el ítem 2.3. Por otro lado, aún se encuentran algunas dificultades que obstaculizan su aplicación y eficacia en las empresas dado que para lograr el éxito en la implementación de LPS es necesario combinar prácticas ampliamente desarrolladas y trabajar de forma colaborativa y eficiente en todos los niveles de jerarquía (Lagos, Herrera, Muñoz & Alarcón, 2022). A continuación, se explica el concepto y los beneficios del LPS.

### **2.1.1 *Last Planner System* (LPS): sistema de control de la producción de proyectos**

El *Last Planner System* (LPS) se creó a principios de la década de 1990 como un sistema de control de la producción de los proyectos que permite dar seguimiento al progreso de estos con el fin de que se cumplan los objetivos dentro del costo, plazo y alcance definido (Ballard & Tommelein, 2016). Es decir, el LPS “proporciona un marco sistemático basado en ciclos cortos de preparación, compromiso y control del trabajo para permitir la implementación de acciones correctivas” (Lagos, Herrera, Muñoz & Alarcón, 2022, pp. 1). Englobando lo mencionado, esta metodología cuenta con características que potencian la capacidad de gestión de proyectos.

Actualmente, el estándar de gestión de proyectos más difundido es el del PMBOK, el cual ha sido desarrollado por el PMI (*Project Management Institute*). El PMBOK sugiere gestionarlos teniendo en cuenta cinco procesos fundamentales dentro de los cuales se hallan la planificación y el monitoreo/control. Según este estándar, la labor de planificar involucra una serie de pasos para determinar el alcance del proyecto, refinar los objetivos y definir el curso de acción para alcanzarlos exitosamente. Asimismo, monitorear y controlar un proyecto implica procedimientos para dar seguimiento, analizar y regular el progreso y desempeño de este. En este sentido, para gestionar proyectos de construcción, se sugiere enfatizar en los 3 procesos mencionados, ya que ellos conforman la estructura principal de la dirección de proyectos y cuyo adecuado direccionamiento conlleva al éxito del proyecto.

En la industria de la construcción, los sistemas mejorados de producción *Lean* se adoptaron progresivamente a causa de los problemas recurrentes de la planificación tradicional: ruta crítica no identificada, escasos controles de productividad, sobrecostos, entre otros. Estos han venido repercutiendo negativamente en los trabajos del sector, debido a que han causado mayor incertidumbre y variabilidad en los proyectos. Frente a ello, Pons (2019) comenta que la integración entre la planificación colaborativa y el uso del LPS se ha convertido en una herramienta que alinea los objetivos del proyecto con los del *Lean Construction* de modo que mejora la productividad reduciendo la variabilidad y los distintos tipos de desperdicios y maximiza la entrega de valor al cliente, ya que permite la planificación de manera oportuna. Asimismo, Retamal et al. (2022)



señalan que la adecuada adopción del LPS mejora la comunicación horizontal entre los responsables directos de modo que se puedan tomar decisiones de manera proactiva.

Como se mencionó en el ítem principal, la mejora continua también forma parte de los resultados del uso del LPS. Esta es consecuencia directa de que los interesados participen colaborativamente durante las reuniones semanales, ya que allí se puede dar un intercambio de ideas, soluciones o propuestas a problemas identificados aprovechando las capacidades de todo el equipo (Salem et al., 2006).

Finalmente, Alarcón et al. (2005) encontró que las principales barreras enfrentadas para la implementación estandarizada y completa del LPS en las constructoras son el escaso tiempo con el que se cuenta para aplicar estas prácticas en proyectos ya iniciados, falta de personal capacitado en el área, poca o nula organización de la empresa y el bajo interés por fomentar espacios de retroalimentación. Del mismo modo, Daniel et al. (2015) y Lagos, Herrera, Muñoz y Alarcón (2022) señalan que las implementaciones parciales del LPS limitan el potencial y los beneficios del uso de esta herramienta. En el siguiente ítem, se presenta el desglose de las fases de planificación según el LPS.

## 2.1.2 Niveles de planificación LPS



**Figura 2.** Niveles de planeamiento.

Fuente: Adaptado de Current Process Benchmark for the Last Planner System (Ballard y Tommelein, 2016).

La figura 2 propone un desglose de fases inherentes a la planificación propuesta por el *Last Planner System*. Las sesiones de planeamiento son realizadas por el equipo de proyecto en reuniones *pull-planning*, las cuales favorecen la identificación temprana de restricciones, de oportunidades de mejora y de prefabricación (Pons, 2019). Es decir, durante estas sesiones, se fomenta la participación de los involucrados para establecer hitos, realizar lluvia de ideas, lograr consensos, entre otros. Mediante el LPS, se busca integrar estas fases para crear un flujo de trabajo confiable, continuo y que se enfoque en el aprendizaje continuo. En la figura 3, se presenta el esquema de integración de las fases del *Last Planner System* que se detallarán a continuación.



**Figura 3.** Esquema de integración de fases LPS.

Fuente: Lean Construction y la planificación colaborativa (Pons, 2019).

- **DEBERÍA (SHOULD):**

Es la fase en la que se desarrolla el plan o cronograma maestro en el cual se definen los alcances principales de todo el proyecto, así como los puntos de control más destacados del ciclo de vida conocidos como hitos. Este cronograma es elaborado para efectos contractuales con los clientes y para dar el respectivo seguimiento y control del avance de la obra. Asimismo, considera ciertos *buffers* o colchones de tiempo para suplir posibles contingencias futuras. A continuación, se elaboró la tabla 1 para presentar sus principales componentes.

**Tabla 1.** Principales componentes considerados en el Plan Maestro.

Nº	Componente
1	Análisis de interesados
2	Definición de alcance de proyecto
3	Realización de Estructura de desglose de trabajo (EDT)
4	Análisis de riesgos
5	Identificación de recursos críticos

- **SE PUEDE (CAN):**

Es la fase en la que se desarrolla una planificación más detallada cuyo resultado es un cronograma que contempla una ventana de 4 a 6 semanas conocido como *Lookahead*. Se busca identificar las actividades que son potencialmente ejecutables. Se realiza a través de sesiones concurrentes en las que se involucra la participación de los últimos planificadores. De manera análoga al plan maestro, se identifican las restricciones de las actividades que se ejecutarán. Posteriormente a su identificación, se gestionan los recursos necesarios para garantizar el levantamiento de las restricciones y el cumplimiento de los compromisos asumidos para dichas actividades. De esta manera, administrando el plan y el desarrollo de actividades en un flujo continuo se reduce la variabilidad, lo cual conlleva a generar confianza en el trabajo. La tabla 2 señala los tipos de restricciones que se debe considerar al analizar el *Lookahead*.

**Tabla 2.** Principales restricciones por identificar en el *Lookahead*

Nº	Tipo	Análisis
1	Contractual	Selección de proveedor, documentación.
2	Materiales	Metrados, acopios, solicitudes.
3	Equipos	Disponibilidad, operatividad.
4	Información	Incompatibilidades, requerimientos de información, aprobaciones.
5	Mano de obra	Dimensionamiento de cuadrillas, subcontratas, responsables.
6	Seguridad	Condiciones de obra, procedimiento de trabajo
7	Terreno	Actividades previas, condiciones de obra

- **SE HARÁ (WILL)**

Es la última etapa de la fase de planificación que considera 1 a 2 semanas según la confiabilidad que desea alcanzar el equipo de proyecto. Para el desarrollo de esta planificación, se parte del *Lookahead* para analizar la semana siguiente a la fecha de estudio. El objetivo es realizar una programación de las actividades cuyas restricciones, identificadas en el “se puede”, ya hayan sido liberadas, por el hecho de que estas pasan a convertirse en metas claras para los últimos planificadores o encargados de área. Este personal asume la responsabilidad y el compromiso de dichas actividades. La información de este plan semanal debe ser minuciosa y comprensible para que pueda ser gestionada por cualquier encargado de actividad.

Por ello, es muy recomendable que se desarrollen cuadros con información concisa y detallada de las metas y actividades a desarrollarse. Luego, deben extraerse métricas de la confiabilidad del plan y del cumplimiento de los compromisos asumidos en esta última etapa. Por ejemplo, una de ellas es el PPC (porcentaje del plan completado), el cual según Ballard (2016) mide la confiabilidad del flujo de trabajo y los compromisos del equipo. Finalmente, el PPC se calcula a través de la siguiente expresión:

$$\text{PPC (\%)} = \frac{\text{N.º DE TAREAS COMPROMETIDAS COMPLETADAS}}{\text{N.º TOTAL DE TAREAS COMPROMETIDAS PLANIFICADAS}} \times 100$$

## **2.2 *Virtual Design and Construction (VDC) como herramienta catalizadora del sistema de producción Lean Construction***

La metodología *Virtual Design and Construction (VDC)* fue desarrollada por el *Center for Integrated Facility Engineering (CIFE)* de la Universidad de Stanford en el año 2001. Por un lado, el VDC es una práctica en la que tanto los productos, así como los procesos de construcción asociados se modelan de forma colaborativa y detallada utilizando las herramientas ofrecidas por el *Building Information Modeling (BIM)* (Kunz y Fischer, 2012). Por otro lado, se entiende como el uso de modelos compartidos que faciliten la visualización e interpretación multidisciplinaria (entre ingenieros, arquitectos, contratistas, cliente e interesados) de los proyectos de construcción (Fischer, Reed, Khanzode & Ashcraft, 2014). Las herramientas que VDC proporciona mediante el uso de modelos permiten simular la interacción entre la forma de los productos inherentes al proyecto de las diversas especialidades que este comprende y los procesos que conllevan ejecutarlas teniendo en cuenta criterios ajustados a la eliminación de desperdicios.

La mayor ventaja de VDC es que “proporciona un método integrado para la planificación de la producción en la construcción, eliminando los conflictos y errores de diseño en el mundo virtual antes de que puedan manifestarse en el mundo real” (Maraqa, Sacks y Spatari, 2020, pp. 987). Por lo que, podría entenderse también como una estrategia de gestión de proyectos tanto durante la etapa de diseño como de construcción. Es más, mejora el cumplimiento de los objetivos del cliente a través de su acoplamiento al sistema de producción *Lean Construction* (Correa, 2020). La detección y seguimiento activo de

interferencias en el mundo virtual es sumamente importante, ya que el impacto en el costo, plazo y rendimiento puede llegar a ser considerable si se omite.

A pesar de todo lo que ofrece el VDC, aún existen barreras para su implementación en las empresas. Estas se dan por factores como la falta de colaboración, comunicación y compromiso entre los interesados, carencia de personal (dentro del equipo del proyecto) con las competencias características que amerita el VDC; la desconfianza; y el poco o nulo intercambio de información (Abdullah, Abdul-Razak, Abubakar & Mohammad, 2009). Ello se debe tener en cuenta al momento de desarrollar la propuesta de integración, ya que solo así es posible identificar las limitaciones a las que se enfrentará. Una vez mencionado esto, se presentará los 3 pilares del VDC, los cuales permiten mejorar la gestión durante el desarrollo del proyecto y a su vez son un soporte para el cumplimiento de los objetivos del proyecto y en consecuencia lograr los objetivos del cliente.

### **2.2.1 *Building Information Model (BIM): modelo virtual fiable para la toma de decisiones***

Ma, Zhang y Li aseveran que la colaboración en los métodos tradicionales de ejecución de proyectos se ve obstruida debido a que los objetivos de los interesados no están alineados mutuamente y a que cada uno de ellos dirige todo su esfuerzo solo al trabajo que le corresponde entregar, mas no al producto final lo cual no maximiza el valor del proyecto (2018). Ante ello, es necesario recurrir al uso de herramientas que soporten el trabajo colaborativo, por lo que este ítem se centrará en la breve presentación de una de ellas: el *Building Information Modeling (BIM)*.

Mahalingam, Kumar Yadav & Varaprasad señalan que “BIM ha surgido como una plataforma digital a través de la cual los equipos de proyecto pueden compartir mejor la información, visualizar los procesos del proyecto y tomar decisiones que mejoren el rendimiento del proyecto [Construction Users Roundtable (CURT) 2005; Teicholz 2004]” (2015, pp. 1). Asimismo, BIM nació con la finalidad de entender las necesidades del cliente mucho antes de que se inicie la ejecución del proyecto (Aslam, Gao & Smith, 2021), mejorar la coordinación entre las diferentes partes interesadas para lograr información integrada y de reducir los cambios y retrabajos durante las etapas de diseño y construcción (Maraq, Sacks & Spatari, 2022).

Los modelos BIM 3D facilitan la rápida actualización de la planificación gracias a que se puede extraer información relevante de estos para tomar la mejor decisión respecto al plan (Filion, Valdivieso & Iordanova, 2022). Asimismo, según dichos autores, integrar el uso de modelos BIM 3D y la simulación 4D con los principios de construcción *Lean* incrementa la visualización y comprensión de la planificación y programación de obra, así como también la colaboración dentro del equipo de trabajo.

### **2.2.2 *Project Production Management (PPM): Gestión de la Producción del Proyecto***

Según Majumdar et al. (2022) y Salazar et al. (2023), PPM hace referencia a la planificación y gestión de las actividades físicas realizadas en un proyecto, considerando el mismo como un sistema de producción, ya que se centra en sus procesos y operaciones. El PPM se enfoca en el control de los flujos de trabajo, así



como también de las tareas y actividades del proyecto con la finalidad de reducir la variabilidad, optimizar el rendimiento, disminuir o eliminar aquellas actividades o procesos que no aportan valor al proyecto y evitar retrasos (Del Savio et al., 2022; Tuesta et al., 2022).

Rischmoller et al. (2018) y Rodríguez (2021) señalan que el PPM está completamente conectado con el *Lean Construction* dado que ambos surgieron a partir de la Ciencia de Operaciones. Por lo tanto, se pueden seguir usando las herramientas *lean* tales como el *Last Planner System* o el *pull-planning*, las cuales eran comúnmente utilizadas antes de la introducción como tal del concepto de PPM. Estas herramientas al estar relacionadas con los procesos tienen como finalidad destacar las actividades más críticas y garantizar que se valide la planificación teniendo en cuenta los hitos contractuales y las restricciones mismas del proyecto (Del Savio, 2022; Filion et al., 2022).

### **2.2.3 *Integrated Concurrent Engineering (ICE): Ingeniería Concurrente Integrada como método para facilitar decisiones y mejorar la comunicación***

La base de la Ingeniería Concurrente Integrada fue el Método de Colaboración Extrema (ECM, por sus siglas en inglés) el cual fue impulsado por el *Jet Propulsion Laboratory (JPL)* de la NASA. Dicho método sugería llevar a cabo proyectos complejos de manera eficaz mediante una colaboración integral entre todos los responsables de las distintas áreas, utilizando herramientas eficientes y compartiendo una misma locación de trabajo durante un periodo definido (Del Savio et al., 2022).

Por ello, es de suma importancia que los equipos de proyecto adquieran la capacidad de compartir información, analizar diversas soluciones mediante la colaboración y recibir una retroalimentación constante para que las diversas especialidades puedan mantener interacciones efectivas y de calidad para solucionar problemas de manera diligente y eficaz (Majumdar et al., 2022).

Las sesiones ICE tienen como propósito facilitar que los involucrados compartan información y aborden problemas (detallados en una agenda previamente compartida) de manera efectiva y directa. Esto con la finalidad de reducir la latencia de coordinación y/o toma de decisiones mediante la participación del equipo y el soporte de modelos BIM en una sala de reuniones física o virtual provista de herramientas de colaboración modernas (Fosse et al., 2017; Rischmoller et al., 2018).

### **2.3 Sinergia entre Virtual Design and Construction y Lean Construction**

Durante la revisión de la literatura, se ha notado que varios autores han llegado a la conclusión de que existe una potente sinergia entre el VDC y LC debido a las múltiples interacciones descubiertas (Alarcón et al., 2013; Aslam et al., 2021; Bravo et al., 2019; Fosse y Ballard, 2016, Mahalingam et al., 2015; Mandujano et al., 2015, Rischmoller et al., 2018, Sacks et al., 2010). Aslam, Gao & Smith han hallado 351 interacciones positivas entre las funcionalidades de VDC y los principios de LC dentro de las cuales se destacaron

- la visualización en tiempo real del diseño, el proceso y estado del proyecto (54 interacciones);

- el acceso a los socios del proyecto (42 interacciones);
- la visualización 4D y 5D (37 interacciones);
- comunicación en línea con los principales *stakeholders* (36 interacciones); y
- la interacción con los modelos y simulaciones (31).

Además, estos autores mencionan que la industria de la construcción tiene dificultades para la implementación efectiva de los sistemas del LC a causa de la falta de visualización y flujo de información, por lo que, indican que en definitiva las funcionalidades del VDC resultan ser un buen complemento para facilitarla. Esto debido a que apoya en la “identificación de pérdidas, en mejorar la productividad, aumentar el valor y mantener el flujo continuo” (2021, pp. 22) así como también por el hecho de que ambos enfocan sus esfuerzos en cumplir y entender los requisitos y objetivos del cliente.

Por un lado, Mandujano, Alarcón, Dave, Mourgues y Koskela han desarrollado una matriz la cual muestra 405 interacciones tanto positivas como negativas, donde estas últimas hacen referencia a que el uso de VDC dificulta la implementación de un principio de LC. Por ejemplo, la excesiva producción de documentos de construcción aumenta el tiempo de procesamiento que el interesado requiere para encontrar la información que necesita lo cual atenta contra el principio de “reducir el tiempo de ciclo”. La tabla 3 muestra la adaptación de esta matriz. Las interacciones más recurrentes fueron las siguientes:

- planificación de la construcción / modelo 4D – transparencia,
- planificación de la construcción / modelo 4D – reducir el tiempo de ciclo,
- visualización del diseño – transparencia, y
- producción de documentos de construcción – reducir la variabilidad.

Por otro lado, coligieron que si se pone en práctica todo el marco VDC se presenta una mayor cantidad de interacciones con los principios del *Lean Construction* a diferencia de las que se obtendría trabajando solo con la componente BIM.

**Tabla 3.** Frecuencia de las interacciones entre los principios de *Lean Construction* y las funcionalidades VDC.

ID	VDC/FUNCIONALIDADES	POP	PRINCIPIOS PARA EL DISEÑO Y MEJORA DEL PROCESO DE FLUJO											SOLUCIÓN DE PROBLEMAS		DESARROLLO DE SOCIOS	Total	
			REDUCIR LAS ACTIVIDADES QUE NO AGREGAN VALOR	EN FOCUE EN LOS REQUISITOS DEL CLIENTE	REDUCIR LA VARIABILIDAD	REDUCIR EL TIEMPO	SIMPLIFICAR	FLEXIBILIDAD	STANDARIZAR	TRANSPARENCIA	CONTROLAR EL PROCESO	CONSTRUYE MEJORA CONTINUA	BALANCEAR EL FLUJO	BENCHMARK	VE Y COMPRUEBALO POR TI MISMO	DECIDIR POR CONSENSO		CULTIVA UNA RED EXTENDIDA
			a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n		o
A	VISUALIZACIÓN DEL DISEÑO	X	11*	10	20	32	8	6	4	25	9	13	6	1	4	7	6	162
B	PRODUCCIÓN DE DOCUMENTOS DE CONSTRUCCIÓN	X	15*	9	19	24*	9*	6	9	12	9	8	5	2	3	4	10	144
C	ANÁLISIS DE OPCIONES DE DISEÑO	X	8	9	5	9	4	3*	4*	7	3	3	2	1	2	7	4	71
D	GESTIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTRO	X	4	2	3	7	3	2	2	2	3	1	2	1			2	34
E	VERIFICACIÓN DE DISEÑO	X	7	4	9	9	4	3	2	9	4	3	2	1	1	1	2	61
F	CÓDIGO DE REVISIONES	X			1	3	1		1	3	1	1		1	1		1	14
G	ANÁLISIS FORENSE	X			1	2	1	1	1	4								10
H	FACILITIES MANAGEMENT	X	2	1	2	3	3	1	2	6	3	2	1	1	1	1	1	30
I	DESPEGUE DE CANTIDAD Y ESTIMACION DE COSTOS / MODELADO 5D	X	4	5	6	14	3	2	2	4	2	2	1	1	1	1	1	49
J	PLANIFICACIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN/MODELADO 4D	X	16	7	13	27	12	10	10	23	10	7	8	3	3	8	9	166
K	MODELADO ORGANIZACIONAL	X	3		3	5	1	1	2	3	2	2	1	2	1	3	4	33
L	ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DEL EDIFICIO	X	5	2	2	7	3	3	3	9	3	4	2	4	2	2	2	53
M	PRODUCTO / PROCESO DE COMUNICACION EN LINEA	X	8	5	12	32	9	6	5	22	6	11	6	2	5	14	24	167
<b>Total</b>			<b>83</b>	<b>56</b>	<b>94</b>	<b>174</b>	<b>61</b>	<b>44</b>	<b>47</b>	<b>129</b>	<b>55</b>	<b>57</b>	<b>36</b>	<b>20</b>	<b>24</b>	<b>48</b>	<b>66</b>	

Fuente: Adaptado de Mandujano et al., 2021

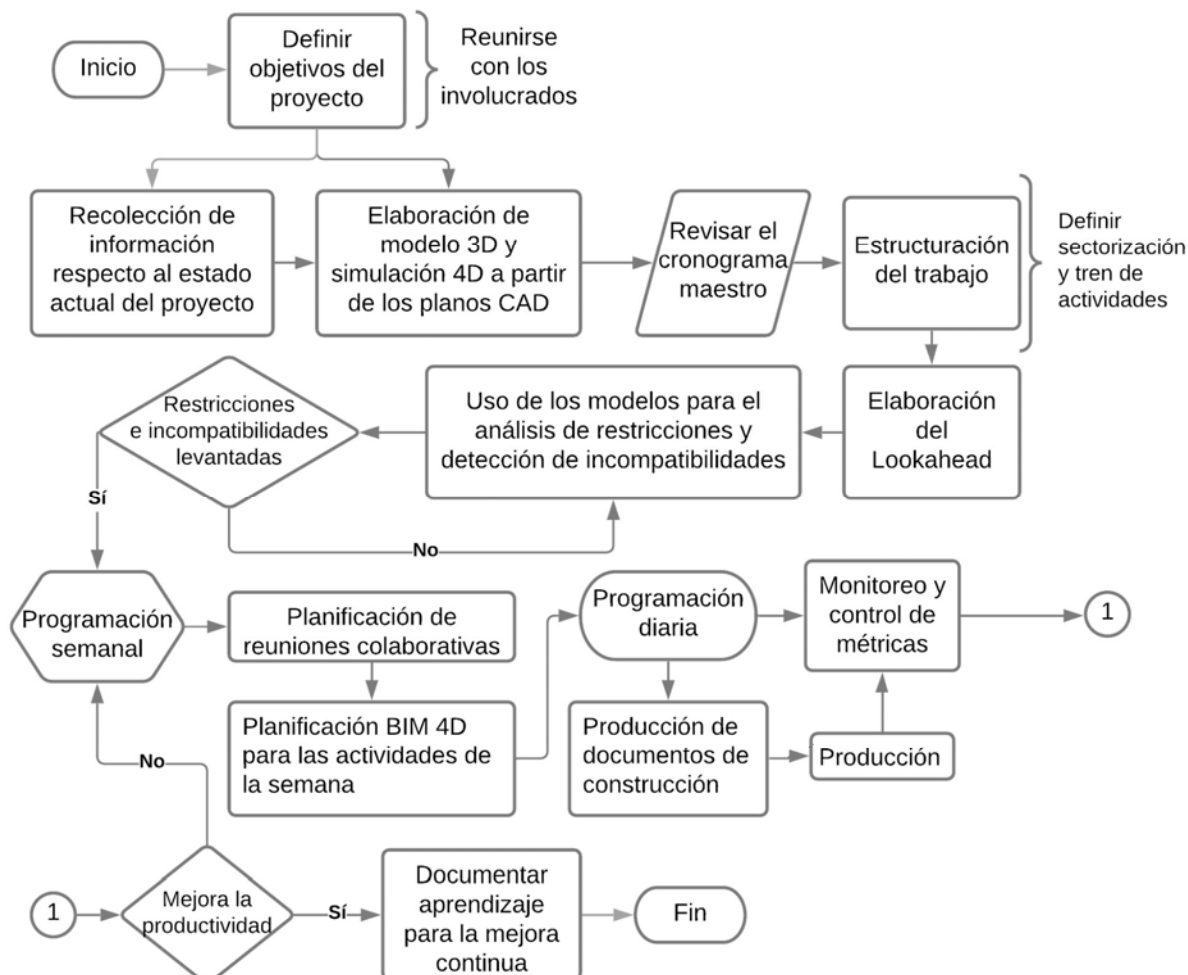
La sinergia también se ve apoyada en los beneficios que se obtienen de aplicar VDC en el Sistema de entrega de proyectos Lean (LPDS, por sus siglas en inglés), el cual se sabe forma parte de la filosofía *Lean Construction*. Khanzode et al. (2006) afirma que el empleo de las herramientas de VDC durante las fases del LPDS permite alcanzar las metas propuestas en cada una de ellas. Menciona que, para la fase de Construcción *Lean* (alcance de la presente tesis), el uso de herramientas de modelado de productos (modelado 3D), y de productos y procesos (modelado 4D) mejoran la productividad siguiendo los principios *Lean*. Esto gracias a la mejora de la gestión visual, coordinación de diversas disciplinas,

mejor estructuración del trabajo, visualización de la secuencia de la construcción, detección y eliminación temprana de interferencias y restricciones; y a que el modelo 4D permite que las discusiones y temas abordados durante las reuniones colaborativas sean más provechosas.

Los resultados de la implementación de las herramientas y funcionalidades del VDC en los diferentes casos de estudio presentados en las investigaciones leídas demuestran mejoras en el porcentaje de plan completado, una temprana detección de incompatibilidades entre las distintas especialidades del proyecto, un incremento en las actividades de valor añadido, mayor reducción de desperdicios y a la mejora de la eficiencia operativa como también de los materiales empleados en la ejecución. No solo se encontró ello, sino que también los métodos de LC mejoran la eficiencia de los procesos del VDC y que el *Last Planner System* desarrolla el espacio ideal previo para la posterior adopción de BIM (Mandujano et al., 2015).

### Capítulo 3. Metodología de integración: *Virtual Design and Construction* como complemento de la implementación del *Last Planner System*

El presente capítulo propone a la metodología *Virtual Design and Construction* como complemento de la implementación del *Last Planner System* en un proyecto de infraestructura inmobiliaria, ya que se ha evidenciado en la literatura los múltiples beneficios que este puede ofrecer al soporte de los principios de la filosofía *Lean Construction*. Además, se señalará qué herramientas del VDC deben aplicarse y durante qué etapas de la planificación. A continuación, se presenta el diagrama de flujo de la metodología a seguir.



**Figura 4.** Diagrama de flujo de la metodología propuesta.

Se considera de suma importancia volver a recalcar que la empresa ejecutora ya había implementado el *Last Planner System* en el proyecto, pero a menor escala y de manera limitada por lo que aún no se habría obtenido el máximo beneficio de este método de control y planificación. Se menciona esto con la finalidad de que el lector identifique y entienda el rol que toma VDC a lo largo de desarrollo de la metodología de integración propuesta.

### **3.1 Definir objetivos del proyecto**

VDC y LPS se enfocan en ofrecer mayor valor a los clientes a partir de mejorar el entendimiento de sus necesidades y el uso de una serie de herramientas. Por lo que, fue necesario realizar una reunión a la cual debieron asistir todos los involucrados en el desarrollo del proyecto: el dueño de la empresa (cliente), el jefe de proyectos, el staff de obra, el maestro de obra y los capataces. Ello con la finalidad no solo de que el cliente diese a conocer, expresa y claramente, los objetivos y requisitos que espera se satisfagan a lo largo de la ejecución de la obra, sino también para que, mediante la retroalimentación inmediata, se asegure la total comprensión de sus necesidades y se puedan plasmar dentro de los objetivos del proyecto. De este modo, la planificación, desarrollo y control de las actividades se alinearán con los objetivos que quiere alcanzar el cliente. Se sugiere se realice esta asamblea antes de iniciar la implementación de las herramientas que se presentarán más adelante.

## 3.2 Recolección de información

Se debe realizar un sondeo de la situación actual de la obra para tener una base sólida que nos permita comparar, discutir y validar los resultados posteriores a la integración de VDC al LPS durante el proyecto, asimismo, para verificar que se ha cumplido con los objetivos del proyecto y del cliente. La información recolectada para este fin fue del tipo cualitativa y cuantitativa. La información del primer tipo se obtuvo mediante una investigación cualitativa y la retroalimentación proporcionada por formularios *Plus / Delta*. Por otro lado, el segundo tipo se consiguió a partir de los indicadores de productividad que la empresa tenía computados hasta ese momento. Finalmente, se solicitó al ingeniero residente el cronograma maestro, la sectorización, el tren de actividades, el *lookahead* con el que venían planificando su trabajo y los análisis de restricciones ejecutados en las reuniones.

### 3.2.1. Investigación cualitativa

Guerrero, Cortez y Carchi señalan que “Los métodos cualitativos tienen por finalidad explorar, describir y comprender los fenómenos sociales. [...] desde la perspectiva de los mismos individuos estudiados” (2018, pp. 67-68). Es decir, al ser de carácter subjetivo permite recabar información transparente de opiniones y percepciones del entrevistado respecto a un tema en específico. Existen técnicas de investigación cualitativa directas e indirectas, pero para efectos de la presente investigación se trabajó con la directa mediante una entrevista semiestructurada, ya



que es “una conversación formal, con una intencionalidad, que lleva implícitos unos objetivos englobados en una investigación” (Peláez et al, 2013).

### 3.2.1.1 Entrevista semiestructurada

La entrevista es una técnica directa y puede clasificarse como estructurada, semiestructurada y no estructurada o también denominada en profundidad (Cárcel y Roldán, 2013). La entrevista semiestructurada cuenta con algunas preguntas preestablecidas y con otras libres que pueden emerger durante la realización de esta, lo cual permite al entrevistador ahondar más en los temas y/o aspectos que crea conveniente y fomentar una conversación fluida con el entrevistado.

Los objetivos propuestos para esta entrevista se mencionarán a continuación. Por un lado, se buscaba conocer qué tan relacionados están los participantes con (a) los pilares del *Virtual Design and Construction* (VDC), (b) los principios de *Lean Construction* (LC) y (c) *Last Planner System* (LPS). A fin de evaluar si se consideraba conveniente realizar una pequeña charla donde se explicasen mejor los conceptos y diferencias de cada ítem para que así ellos tuviesen un mejor entendimiento acerca de lo que se planeaba integrar. Por otro lado, basándonos en su experiencia, se trató de averiguar qué dificultades habían identificado durante la planificación y ejecución de sus actividades y a qué causas le atribuían la disminución de la productividad en obra. Por último, se les pidió sugerencias

para mejorar el desarrollo de las actividades e incrementar la productividad del proyecto en estudio.

### **Estructura de la entrevista**

- Preguntas de control:

Inicialmente, se comunicó los objetivos de la entrevista a los participantes; asimismo, se mencionó que se estaba respetando su autonomía, derecho a la confidencialidad, privacidad y a la protección de sus datos. Seguidamente, se realizaron preguntas de control tales como qué rol desempeña dentro de la obra y cuántos años de experiencia tiene dentro del sector de la construcción.

- Preguntas de la entrevista:

Las preguntas se diseñaron para cumplir con los objetivos señalados líneas arriba. Estas eran del tipo abiertas, ya que se buscaba que los participantes puedan expresar sus opiniones y precisar sus respuestas para así dar lugar a la construcción de nuevas interrogantes de interés para el estudio. Las preguntas elaboradas se presentan en la siguiente tabla.

**Tabla 4.** Correspondencia entre las preguntas de investigación con los objetivos planteados para la recolección de la información cualitativa.

<b>Objetivo</b>	<b>Pregunta de la entrevista</b>
a) Determinar el grado de conocimiento con respecto a los pilares del VDC (BIM, ICE, PPM o diseño de procesos)	¿Qué es lo primero que se le ocurre cuando escucha hablar de BIM? - Componente: BIM

Objetivo	Pregunta de la entrevista
	<p>¿Ha participado alguna vez en reuniones en las cuales se planificaba el entregable a partir del hito final hacia atrás? - Componente: gestión de la producción de proyectos</p> <p>De todas las reuniones a las que ha asistido, ¿en cuántas se ha fomentado su participación para la resolución de algún problema y además se ha hecho uso de modelos 3D? - Componente: sesiones ICE</p> <p>En obras previas, ¿usted conocía los objetivos del cliente y del proyecto? - Componente: metas del proyecto y metas del cliente</p>
b) Averiguar si manejan los principios <i>Lean</i>	<p>¿Qué entiende por <i>Lean Construction</i> o Construcción sin pérdidas?</p> <p>¿Qué principios conoce para maximizar el valor y reducir el desperdicio en la construcción?</p>
c) Indagar si ha trabajado indirectamente con las herramientas del <i>Last Planner System</i>	<p>¿Ha trabajado alguna vez con el sistema del último planificador (LPS); es decir, la planificación por fases?</p> <p>¿Qué significa para usted los términos tren de actividades, <i>lookahead</i>? ¿Qué se mide a través del porcentaje de actividades cumplidas o PPC? ¿Lo considera importante?</p>
d) Identificar las dificultades halladas en la ejecución de los proyectos	<p>Basándonos en sus proyectos anteriores, ¿qué dificultades o deficiencias ha identificado en el desarrollo de ellas?</p> <p>Actualmente, ¿qué dificultades o deficiencias ha identificado en el desarrollo de esta obra?</p> <p>¿Tiene alguna sugerencia para incrementar la productividad de la obra?</p>

Fuente: Elaboración propia.

### Participantes

Dado que el alcance de la presente tesis es mejorar la implementación del sistema del último planificador (LPS), la entrevista estuvo dirigida justamente hacia los últimos planificadores del equipo; es decir, aquellos quienes son responsables de la asignación final del trabajo o dicho de otro modo a las personas que se encuentran dentro de la última línea de planificación de las actividades (se entiende que el personal después de ellos

solo se centra en la ejecución de las actividades). Se debe señalar que no se revelará los nombres de los participantes, debido a la protección de datos mencionado al inicio de la entrevista. La siguiente tabla indica el código de identificación que se le asignó a cada uno de los participantes.

**Tabla 5.** Personas que desempeñan la función de últimos planificadores dentro del proyecto de construcción.

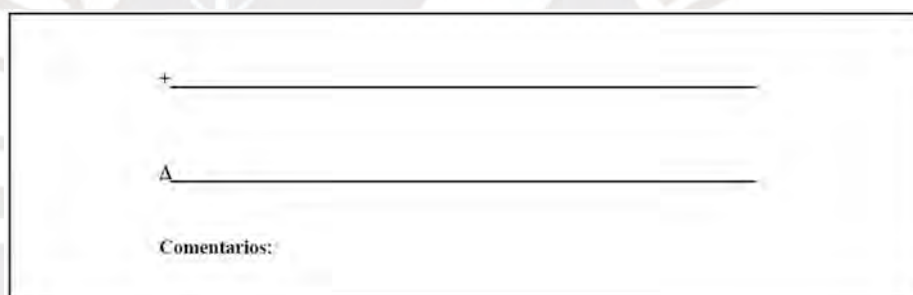
<b>Matriz de últimos planificadores</b>	
<b>Código</b>	<b>Cargo</b>
<b>Entrevistado 1</b>	Residente de obra
<b>Entrevistado 2</b>	Maestro general de obra
<b>Entrevistado 3</b>	Topógrafo
<b>Entrevistado 4</b>	Capataz de carpintería
<b>Entrevistado 5</b>	Capataz de instalaciones sanitarias
<b>Entrevistado 6</b>	Capataz de instalaciones eléctricas
<b>Entrevistado 7</b>	Ingeniero de producción
<b>Entrevistado 8</b>	Capataz de acero
<b>Entrevistado 9</b>	Capataz de albañilería y acabados

Fuente: Elaboración propia

### 3.2.1.2 *Plus / Delta*

*Plus / Delta* es una herramienta compartida por BIM y LC. Se trata de un proceso de retroalimentación formativo muy sencillo y se realiza en pocos minutos; tiene como finalidad la mejora continua del proceso específico que se va a monitorear (Mossman, 2019). Asimismo, identifica actividades que añaden valor, otras que no añaden valor y aquellas que no tienen valor agregado, pero son requeridas en los procesos (Sastri y Rao, 2013). Los procesos se pueden evaluar mediante formularios *Plus / Delta* anónimos. Los *pluses* hacen referencia a todo lo positivo, bueno y funcional

que se viene realizando y los *deltas*, a lo que se puede mejorar y cambiar dentro del proceso (Miller, 2005). Miller plantea el uso del formato mostrado en la figura 5 y señala que el espacio suficiente para plasmarse es en un tercio de hoja. Asimismo, menciona que estos se deben entregar al inicio del proceso y recogerse después de un lapso considerable para que todos puedan rellenarlo. Posteriormente, el evaluador revisa lo escrito y analiza si los cambios sugeridos son factibles o sino qué otras alternativas podrían mejorar aquello en lo que se está fallando. Finalmente, con base en este *Plus / Delta* se debe volver a planificar el siguiente (Mossman, 2019).

The image shows a rectangular form with a thin black border. Inside the form, there are three horizontal lines. The first line is preceded by a plus sign (+). The second line is preceded by the letter 'A'. Below the second line, the word 'Comentarios:' is written in a smaller font. The form is intended for participants to write their feedback and suggestions.

**Figura 5.** Formulario *Plus/Delta*.

Fuente: Extraído de Miller, 2005

Entonces, el formulario *Plus / Delta* se utilizó para conocer lo que estaba funcionando bien y lo que se requería mejorar dentro de las reuniones semanales que se venían llevando a cabo para realizar la planificación semanal. Antes de iniciar la reunión, se brindó los formularios a todos los participantes y se les explicó qué se quería conseguir a través de este. Al finalizar la reunión, se recogió los papeles y durante el periodo de tiempo entre reuniones semanales (1 semana) se evaluó y planificó los cambios que

se iban a realizar en la siguiente reunión.

### 3.2.2. Medición de indicadores cuantitativos

Como se mencionó, el proyecto ya había implementado algunas herramientas el *Last Planner System*, pero todavía no se había logrado conseguir los mejores resultados, por lo que se consideró recolectar los indicadores cuantitativos con los que ya contaban para darnos un panorama del estado actual en el que se encontraba la obra respecto a productividad y variabilidad. También, se tenía previsto que sirvieran como punto de comparación para los futuros resultados obtenidos después de la integración habilitada por el VDC.

#### 3.2.2.1 Porcentaje de plan completado (PPC)

También conocido como porcentaje de actividades cumplidas (PAC). Es una métrica que mide la confiabilidad del plan, mas no el avance de la obra, lo cual significa que una obra atrasada puede tener un PPC alto y que una obra dentro del plazo puede tener un PPC bajo. Entonces, este indicador permite conocer qué porcentaje de las actividades se están cumpliendo respecto del total planificado para la semana. Para ello, se usan criterios no binarios; es decir, la actividad se ha realizado **sí** o **no** (no existe el casi). El enfoque en el cumplimiento del plan tiene impacto en la reducción de la variabilidad de los proyectos. El PPC se obtiene de la siguiente manera:

$$\text{PPC (\%)} = \frac{\text{N}^\circ \text{ de tareas realizadas}}{\text{N}^\circ \text{ total de tareas planificadas}} * 100$$

Finalmente, se presentará en gráficas el PPC acumulado del tiempo comprendido para el alcance de la tesis y se comparará frente a un PPC meta u objetivo igual a 75%. Este valor se estableció según la data extraída de los otros proyectos de la empresa.

### 3.2.2.2 Cantidad de Request for information (RFI)

El término RFI es traducido como solicitud de información, el cual es usado en la industria de la construcción para solicitar información que no está clara o cuyo alcance no está bien definido; así los RFI's permiten aclarar cualquier duda o llenar cualquier vacío existente en la información proporcionada a lo largo del ciclo de vida del proyecto (Riddell, 2018). Una RFI puede enviarse debido a una sustitución o modificación en los planos, la necesidad de que se aclare algo en específico o se brinde información adicional para comunicar la existencia de alguna deficiencia constructiva, entre otros. Es importante darle seguimiento a la cantidad de RFI's mandadas y al tiempo, denominado latencia de respuesta, que los responsables se toman para responderla, ya que este tiene repercusiones en el avance de la obra.

Los RFI's forman parte de las restricciones que se deben analizar y mapear en la fase de elaboración de *lookahead*; representan un tipo de información crítica que puede llegar a condicionar el avance del proyecto. Debido a que, en gran parte los RFI's generan adicionales de obra o condiciones que ponen en riesgo el cumplimiento del plazo y costo.

### 3.3 Elaboración de modelos

A partir de este proceso, se inicia la integración de las herramientas de VDC para mejorar la implementación del *Last Planner System*. Como se mencionó en el capítulo 2, el VDC presenta herramientas de modelado de productos, procesos y organizaciones. El alcance de la tesis nos centra únicamente en el modelado de los productos (modelo 3D) y producto-proceso (modelo 4D). Se emplearán los modelos virtuales para la planificación de las actividades e incrementar el entendimiento del proyecto mediante la mejora de la gestión gráfica durante la ejecución de las actividades correspondientes a la subestructura y superestructura de la edificación. En resumen, se usarán los modelos para potenciar las herramientas de control y planificación del LPS con el fin de optimizar el sistema de producción.

#### 3.3.1 Modelado 3D

Se elaborará el modelo 3D en el software Revit 2021 en base a la información proporcionada por los planos de las especialidades de estructuras, arquitectura e instalaciones sanitarias (II.SS.) y mecánicas (II.MM.).

##### 3.3.1.1 Criterios de modelado

Se creará un modelo 3D basado en los planos de estructuras y arquitectura; posteriormente, se hará lo mismo para las especialidades de II.SS. e II.MM, pero teniendo como referencia base al modelo inicial. Se considera importante destacar que el alcance de la tesis comprende el modelo 3D de la subestructura y superestructura para la especialidad de



estructuras, mientras que para las otras especialidades (II.SS. e II.MM.) se ha visto conveniente solo modelar los elementos correspondientes a la subestructura.

Asimismo, se utilizará un LOD300, el cual permite representar la cantidad, tamaño, forma, ubicación y orientación del elemento tal como se diseñó (BIM Forum, 2020). A partir de un LOD300, se puede usar el modelo para analizar la performance de un edificio, extraer metrados precisos, estimar costos, realizar simulaciones que demuestren la secuencia de las ejecuciones de los elementos, coordinar las distintas especialidades, entre otros (American Institute of Architects, 2013). Para agilizar la iteración de los sectores, es necesario la creación del parámetro “sector”, ya que, al generar las tablas de planificación/cantidades, este campo arrojará el metrado correspondiente a cada sector. Aparte se creará filtros para identificar los sectores de manera gráfica.

### 3.3.2 Modelado 4D

El modelado 4D o simulación de procesos se llevará a cabo haciendo uso del *software* Navisworks, el cual mediante la herramienta *TimeLiner* permitirá asignar una secuencia constructiva a cada uno de los elementos del modelo 3D (previamente ejecutado) según un cronograma de actividades extraído de un Diagrama de Gantt elaborado en el programa Ms Project. Luego, para la detección de choques o incompatibilidades del diseño, se usará la herramienta “*plan-detected*” una vez que

los modelos de las especialidades de estructuras, instalaciones sanitarias y mecánicas se hayan cargado en el Navisworks.

### **3.4 Estructuración del trabajo**

Según el *Lean Construction Institute*, se debe discutir la estructuración del trabajo durante la fase de planificación *pull*, previa al *Lookahead* (s/f). Esta se realiza mediante la distribución y secuenciación de las actividades que deberán ejecutarse para cumplir con los hitos establecidos a lo largo del proyecto. De allí que, se reunirá a los involucrados correspondientes a la fase de la subestructura para llevar a cabo este proceso apoyándonos en la información gráfica y no gráfica brindada por el modelo 3D, como también en el cronograma maestro generado por el ingeniero residente. Se destaca en esta sección la determinación de los sectores y el tren de actividades bajo un enfoque colaborativo.

### **3.5 Elaboración del *Lookahead***

Una vez definidas las actividades que se deberán realizar, el equipo debe concentrarse en identificar y planificar las actividades que realmente se pueden ejecutar. El tiempo horizonte del *Lookahead* será de 3 semanas.

#### **3.5.1 Análisis de restricciones**

Para mejorar el análisis de restricciones del *lookahead*, la metodología plantea organizar mejor las reuniones colaborativas semanales de modo que estas sean potenciadas con la componente ICE y se apoyen en la tecnología (modelo 3D y 4D). La organización de las reuniones se detalla en el ítem 3.6.1. Durante estas, se busca

que todas las partes identifiquen las restricciones dentro de su área y lo comuniquen al resto para luego coordinar las acciones requeridas y designar a los responsables y plazos máximos para el levantamiento de estas. Finalmente, el ingeniero residente será el responsable de dar seguimiento a la resolución de cada una de ellas.

Asimismo, se añadirán más tipos de restricciones para que ninguna sea pasada por alto. Se contará con las siguientes: mano de obra, materiales, equipos y herramientas, información (relacionado al seguimiento de los RFI's), trabajos previos, seguridad y condiciones externas.

### **3.5.2 Detección de interferencias**

Se realizará durante las reuniones usando el modelo 3D federado en el cual se tengan las especialidades de estructuras, ACI, IIMM e IIEE. Se priorizará la detección de interferencias entre las especialidades de los elementos que están próximos a construirse. Las interferencias halladas deben documentarse y solucionarse durante el transcurso de la siguiente semana y en el mejor de los casos durante la misma reunión.

## **3.6 Planificación semanal**

Se programarán las actividades libres de restricciones de la primera semana del *lookahead* con la finalidad de tener un mejor control de la variabilidad de estas. En esta fase, se recurrirá al uso del modelo 4D como propuesta colaborativa para simular la secuencia diaria de las actividades. El modelo permite el intercambio de información e ideas entre todos los participantes, lo cual resulta en varias propuestas de secuenciación de actividades.

Para elegir la planificación final, se probarán las secuencias sugeridas y se elegirá la óptima y realista. Finalmente, se asumirán compromisos para el cumplimiento del plan, se discutirán las métricas detalladas en el ítem 3.8, y se extraerá del modelo 3D los metrados de encofrado, acero y concreto para elaborar los pedidos de material necesario.

### 3.6.1 Planificación de reuniones colaborativas

Se decidió potenciar estas sesiones con la componente ICE mediante el uso del modelo 3D y 4D actualizado. Además, se propuso estructurar la reunión de la siguiente manera:

- la primera mitad del tiempo se dedicará para la planificación semanal y
- la otra mitad, para monitorear el *lookahead*. A su vez, este se subdividirá en
  - una mitad para analizar las restricciones y
  - otra mitad para la detección de incompatibilidades.

Por otro lado, es fundamental que se comunique la agenda y los objetivos de la reunión a los demás participantes con anticipación.

### 3.7 Programación diaria

Se realizará reuniones diarias breves, después de la charla de seguridad con los capataces de las distintas especialidades para la última planificación de las actividades del día. Para mejorar la programación diaria, se llevarán imágenes extraídas del modelo 3D compatibilizado para indicar los sectores que se realizarán en ese día, brindar detalles de las características de ciertos elementos y/o uniones. Asimismo, aprovechando que se ha

modelado el acero en el modelo 3D, se proporcionará los cortes extraídos del modelo a la subcontrata con la finalidad de optimizar este proceso y disminuir los desperdicios. Además, se mencionará a los capataces que si tienen dudas con respecto a alguna actividad o elemento pueden solicitar la visualización del modelo 3D. Al final del día, se computan los índices de productividad, a partir de la información proporcionada por campo y los metrados extraídos del modelo.

### **3.8 Monitoreo y control de métricas**

#### **3.8.1 Plus/Delta**

Se realizará el mismo formulario señalado en el ítem 3.2.1.2., pero, en este caso, se les pedirá que evalúen el nuevo enfoque que se le ha dado a las reuniones semanales.

#### **3.8.2 Porcentaje de plan completado (PPC)**

Las consideraciones para el cálculo del PPC son las mismas que las mencionadas en el ítem 3.2.2.1.

#### **3.8.3 Registro de la productividad (RUP)**

La productividad se medirá con el indicador denominado rendimiento unitario de productividad (RUP). Es de suma importancia registrar y controlar la productividad diaria de las partidas de control de la obra (Ghio, 2001). El RUP se obtiene de la siguiente manera:

$$\text{RUP}_{\text{día}} = \frac{\text{HH's consumidas}_{\text{día}}}{\text{Metrado ejecutado}_{\text{día}}}$$

Por un lado, las horas hombre se extraen de los tareas elaborados por los capataces de las siguientes partidas: acero, concreto y encofrado. Se proporcionó un cuadro de tareas (ver figura 26, ítem 4.2.2.5.2) para uniformizar el formato con el que venían trabajando los capataces de modo que la información esté ordenada y sea entendible. Por otro lado, el cálculo del metrado ejecutado se automatizó usando el modelo 3D en el software Revit y un complemento adquirido de la empresa PROISAC denominado *Dynamic Quantities V.3.5.0*.

Finalmente, se elabora un gráfico en el que se señala la curva de productividad del  $\text{RUP}_{\text{día}}$ , del  $\text{RUP}_{\text{acum}}$  (ayuda a resumir gráficamente la evolución del RUP de la partida) y del  $\text{RUP}_{\text{meta}}$ . El  $\text{RUP}_{\text{meta}}$  se estableció en base a los valores manejados dentro de los otros proyectos multifamiliares de la empresa. Cabe destacar que los valores del RUP son muy variables (Souza, 2000) debido a la fluctuación del metrado de cada sector, cantidad de personas presentes de la cuadrilla y a factores externos, tales como retrasos en la llegada de material y/o equipos, condiciones climáticas, entre otros (Ramírez, 2016).

#### 3.8.4 Cantidad de *Request for information* (RFI)

Se llevará un registro de las solicitudes de información (RFI) enviadas a las distintas especialidades durante la integración de las herramientas de VDC al LPS. Para incrementar el entendimiento del RFI, se adjuntarán imágenes y cortes extraídos del modelo como referencias para los proyectistas.

### 3.8.5 Número de interferencias detectadas

Las interferencias identificadas durante las reuniones colaborativas potenciadas con la componente ICE deberán registrarse en un documento de Excel. Se usará el software Navisworks para detectar las interferencias ya sea mediante la herramienta “*clash detective*” o el recorrido virtual dentro del edificio. Esta métrica servirá para medir la calidad de la información proporcionada por los proyectistas y el desempeño de las sesiones colaborativas para el levantamiento de las interferencias.

### 3.8.6 Metrados

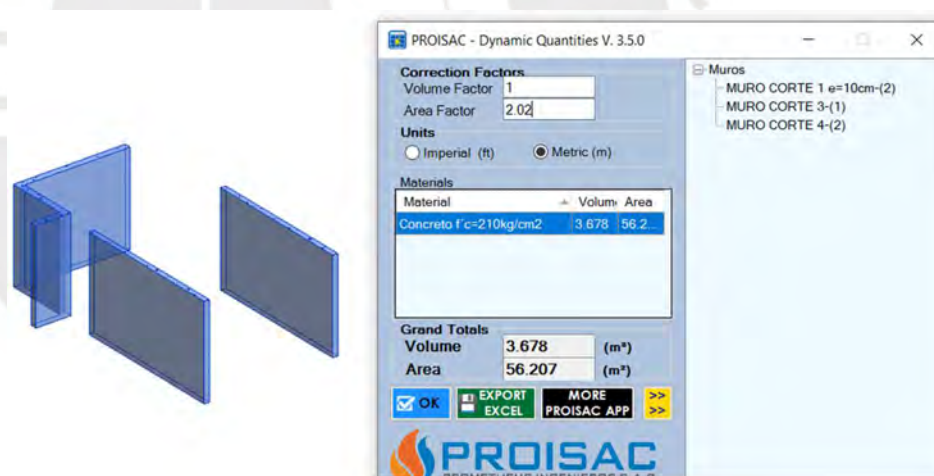
Durante la ejecución de la obra, se realiza la revisión de metrados diarios para solicitar los materiales; específicamente el concreto y acero. Es necesario que estos sean los más exactos posible dado que tienen un gran impacto en el presupuesto y en el avance de la obra. Por ejemplo, si se metra erróneamente el volumen de concreto que se usará para el vaciado del día se pueden desprender dos consecuencias: tener desperdicios del material (lo cual incurre en gastar de más) o que este sea insuficiente para acabar con lo que se había planificado.

Frente a ello, se recurre al uso de modelos 3D para automatizar el metrado, lo cual impacta en la reducción del tiempo requerido para la obtención de este y en la precisión brindada en cuanto a la cuantificación de las cantidades. Dado esto, se considera conveniente cuantificar el porcentaje de reducción de tiempo y la variabilidad de las cantidades metradas a mano en comparación con las cuantías

extraídas del modelo. A continuación, se detallarán los procesos para este fin.

### 3.8.6.1 Tiempo para ejecutar los metrados

Se realizará un ensayo, para el cual se solicitará la participación tanto de integrantes de la obra como de personas externas, para medir el tiempo consumido para metrar el concreto y encofrado de 5 sectores elegidos por los tesistas. También, se tomará el tiempo requerido por los tesistas para extraer el mismo metrado, pero a través del modelo 3D y usando el complemento de PROISAC denominado *Dynamic Quantities V.3.5.0*. para el software Revit, el cual proporciona de manera automatizada el volumen y área de los elementos seleccionados manualmente en el modelo.



**Figura 6.** Ejemplo de la información brindada por el complemento “*Dynamic Quantities V.3.5.0*”

Fuente: Elaboración propia

La figura 6 muestra la información proporcionada por defecto para las 4 placas seleccionadas: volumen, área de encofrado, material, nombre y tipo de los elementos seleccionados. Parte de la información que brinda esta



aplicación proviene de parámetros incluidos dentro del modelo y de la geometría de cada elemento.

### **3.8.6.2 Verificar la exactitud de los metrados**

La variabilidad se medirá comparando el metrado obtenido manualmente versus el extraído a través del modelo.

### **3.8.7 Medición del desperdicio de concreto**

La exactitud y confiabilidad del metrado extraído a partir de un modelo 3D con información bien parametrizada representa una gran ventaja en cuanto a la reducción del porcentaje de merma de concreto comparado con el obtenido a partir de un metrado manual mediante planos 2D, el cual no es tan detallado y tiende a no ser tan preciso e incluso más elevado debido a que redonda volúmenes principalmente en la zona de las uniones entre vigas-columnas. Entonces, la medición considerará el volumen solicitado por nivel versus el volumen geométrico obtenido mediante el uso del complemento *Dynamic Quantities V.3.5.0*.

## **3.9 Documentar aprendizaje**

Como parte de la gestión de comunicaciones, a medida que se desarrollan las actividades y se genera información de estas es importante el almacenamiento progresivo de los gráficos de las curvas de productividad, procesos constructivos, procesos de modelamiento, entre otros. Esto con la finalidad de que la empresa se encamine en la mejora continua de sus procesos y que gran parte de la información sea la base para futuras estimaciones de índices de productividad meta, costos, entre otros de nuevos proyectos.

## Capítulo 4. Caso de estudio

Este capítulo desarrolla la adopción de las herramientas de la metodología VDC para la mejora de la herramienta de producción *Last Planner System* (LPS) en las etapas de planificación, ejecución, monitoreo y control de la fase de subestructura de un edificio multifamiliar.

### 4.1 Descripción del proyecto multifamiliar



**Figura 7.** Carátula del folleto de venta del proyecto  
Fuente: GRUPO MG

El proyecto "Multifamiliar Liri" ha sido diseñado y ha sido construido por la inmobiliaria constructora GRUPO MG. El proyecto se ubica en la esquina de la avenida Antonio José de Sucre con la calle Carlos Bondy, en el distrito de Pueblo Libre, provincia y departamento de Lima. Este proyecto consta de 18 pisos y 3 sótanos ubicados en un área de 600 m<sup>2</sup> con un total de área techada de 7,507 m<sup>2</sup>. El sótano cuenta con muros de sostenimiento anclados, para los dos primeros anillos, y sin anclajes, para el último anillo.

El sistema estructural de la subestructura está conformado por losas de transferencia con muros y losas macizas. Asimismo, se considera relevante mencionar que el proyecto no ha considerado el empleo de acero dimensionado para la ejecución del edificio.

Prioritariamente, se debió definir el alcance de la aplicación e investigación de la presente tesis; por ello, se procedió a delimitar el análisis a la fase de subestructuras de la edificación la cual abarca la construcción de 3 sótanos, cimentaciones y 2 cisternas. Por un lado, con la finalidad de optimizar los procesos de producción, los esfuerzos se han enfatizado en la mejora y potenciamiento de la herramienta de control y planificación denominada *Last Planner System*, la cual ya venía siendo usada por el equipo de obra. Por esa razón, se propuso y llevó a cabo la creación de tablas para el control de la productividad relacionada a la mano de obra y materiales, el mejoramiento del registro de análisis de restricciones, potenciamiento del control de la confiabilidad de compromisos mediante la medición del PPC (porcentaje de plan completado).

Por otro lado, se usaron las herramientas de la metodología VDC enfocadas en el modelamiento de productos (3D) y de productos-procesos (4D). Se utilizó el software Revit 2021 para elaborar una representación virtual del edificio que cuente con información relevante para la planificación y construcción y el software Navisworks Manage 2021 para el modelado y entendimiento de los procesos constructivos. Asimismo, estas herramientas fueron útiles para la toma de decisiones durante las reuniones concurrentes del LPS.

## Recursos tecnológicos

Por un lado, como ya se mencionó, se ha utilizado los softwares *Revit 2021*, para la elaboración de los modelos de las especialidades de estructuras y MEP, y *Navisworks Manage 2021*, para realizar la coordinación de estos. Además, fue necesario el software *AutoCAD 2020* dado que los planos proporcionados por la inmobiliaria se habían elaborado en un formato CAD. Por otro lado, en lo relacionado al hardware, se contó con lo siguiente:

- Laptop Asus: Procesador Core i7 / 12GB ram / 4GB de tarjeta gráfica
- Laptop Lenovo IdeapadGaming: Procesador Core i5 / 8GB ram / 4GB de tarjeta gráfica
- Proyector multimedia Marca Sony

## 4.2 Recolección de datos

La recolección de datos se realizó en 2 etapas. La primera etapa fue antes de que se interviniera en la gestión y planificación de la obra y la segunda, durante la adopción de las herramientas de *Virtual Design and Construction* al *Last Planner System*. A su vez, se debe destacar que, durante la primera etapa, el proyecto monitoreaba y controlaba tan solo un par de indicadores, debido a que la empresa no contaba con un estándar de control de la productividad de la mano de obra, materiales y equipos.

### 4.2.1 Primera etapa

#### 4.2.1.1 Entrevista semiestructurada

Por un lado, se realizaron entrevistas a los últimos planificadores para

determinar qué tan relacionados estaban con los pilares del VDC, los principios de LC y el LPS. Así como también, para conocer los problemas (relacionados a la productividad, control y planificación) por los que habían experimentado en sus obras anteriores y durante esta. Finalmente, los entrevistados brindaron ideas para mejorar el desempeño de las actividades. Las entrevistas fueron grabadas y se tuvo una duración total de 172 minutos aproximadamente. La transcripción se encuentra en el siguiente enlace:

<https://drive.google.com/drive/folders/1iifvkZRWdTBMVpL6dlE7UeetdxOyMtZU?usp=sharing>

**2. ¿Ha participado alguna vez en reuniones en las cuales se planificaba el entregable a partir del hito final hacia atrás?**

Sí, esto lo realizamos en reuniones semanales y quincenales dependiendo de la obra. Estas nos sirven para ver las dificultades, ya que se ve el futuro del proyecto. Durante estas reuniones, se hacía uso de los planos de estructura y arquitectura, y se sobrecargaban (superponían) para la detección de incompatibilidades. Se contaba con la presencia de los ingenieros de campo, residente, capataces y maestro de obra. Después de haber planificado y encontrado los errores producto de las incompatibilidades en los planos, el ingeniero residente elevaba las consultas al responsable adecuado.

**3. De todas las reuniones a las que ha asistido, ¿en cuántas se ha fomentado su participación para la resolución de algún problema y además se ha hecho uso de modelos 3D?**

Mí participación siempre se ha fomentado porque me he desempeñado como la cabeza de campo, pero solo en las reuniones de las 2 últimas obras ejecutadas en estos 2 últimos años se usaron los modelos para las reuniones.

**Figura 8.** Extracto de la transcripción de la entrevista realizada.

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, después de finalizada la entrevista, se brindó una explicación breve acerca de los pilares del VDC y de las herramientas del LPS para realizar un aporte en la capacitación de los trabajadores y que estos

a su vez pudiesen asociar dichos conceptos a su realidad y ponerlos en práctica. Estas minicharlas tuvieron una duración de 15 minutos.

#### 4.2.1.2 Planificación semanal

La planificación semanal se realizaba los viernes después de la jornada de trabajo. La recolección de los datos relacionados a cómo se llevaban a cabo las reuniones y a los recursos empleados durante estas para transmitir la información al equipo se hicieron a través de formularios *Plus/Delta*. Estos se repartieron a todos los asistentes de la reunión de planificación de la semana 14 de la obra. Los formularios escaneados se encuentran en el siguiente enlace:

<https://drive.google.com/drive/folders/1rDslomj9tSgbDZZXo-0y88-MxjKsp9oJ?usp=sharing>

#### **FORMULARIO PLUS & DELTA**

+ El uso de la pizarra y los papalotes es de gran ayuda.  
 Se coordina y programa la mayoría de trabajos durante la reunión.  
 Me gusta que nos den oportunidad de participar en la discusión de los temas.

Δ

Acentuar la duración de las reuniones  
 Falta una agenda cronometradora para la exposición de cada especialidad y que se respete.

Comentarios:

En obras previas la reunión duraba 4 horas y más se tocaban temas de albañilería y acabados, y mi tema de I.E. quedaba al último.

**Figura 9.** Formulario Plus/Delta extraído de la semana 14 de la obra

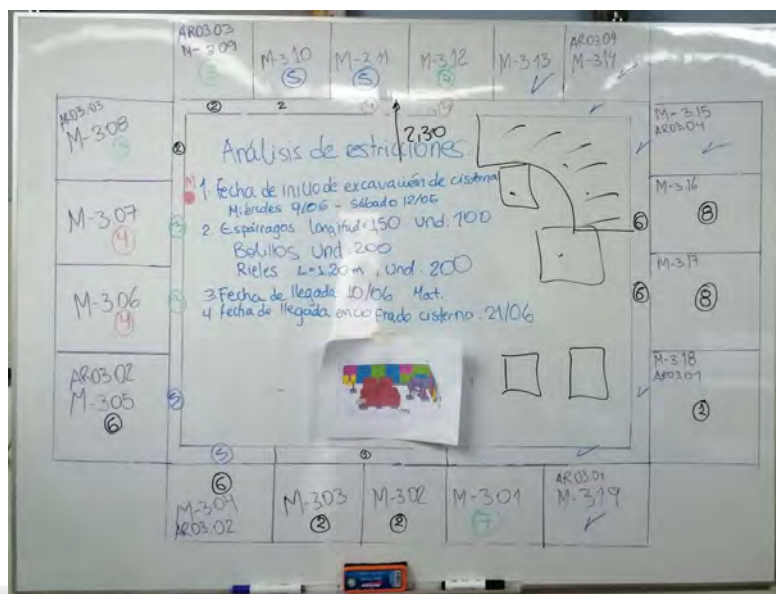
Fuente: Elaboración propia

En resumen, el resultado más resaltante fue el siguiente: las reuniones no contaban con un orden claro para la exposición de los temas, por lo que

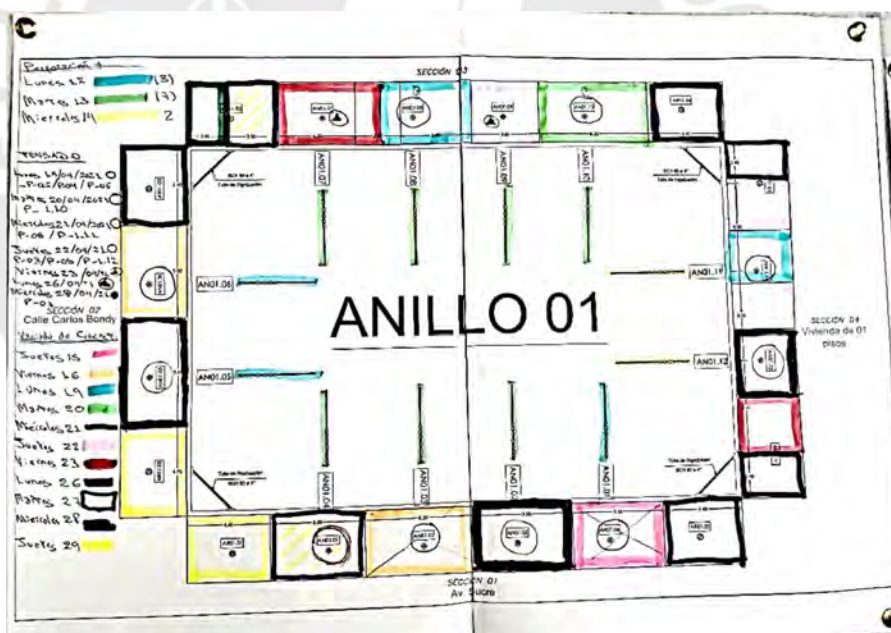
varias veces se redundaba la información y, por ende, el tiempo de las reuniones se prolongaba demasiado.

Cabe resaltar que, para complementar lo anterior, los tesisistas presenciaron un par de reuniones. A partir de esto, se obtuvo la siguiente información:

- En primer lugar, se advirtió que los encargados de la especialidad MEP no participaban en estas. Al consultar el motivo, se nos señaló que estos se irían incorporando una vez iniciadas sus labores dentro del proyecto.
- En segundo lugar, previo al inicio de la reunión, el ingeniero residente replicaba el plano de los muros anclados en la pizarra e indicaba los sectores ejecutados. Luego, se discutía con todo el equipo las causas de las dificultades suscitadas durante la semana. Finalmente, el residente mostraba la planificación de la semana siguiente e iniciaba el análisis grupal de las restricciones de cada partida (relacionadas a mano de obra, material y equipos) para lograr dicha meta, las cuales se escribían en la pizarra, como se muestra en la figura 10. Al día siguiente, el ingeniero elaboraba el resumen de la planificación de la semana tal cual como se muestra en la figura 11.



**Figura 10.** Análisis de restricciones  
Fuente: GRUPO MG



**Figura 11.** Resumen de la planificación de la siguiente semana  
Fuente: GRUPO MG



#### **4.2.1.3 Porcentaje de plan completado**

Debido a que se contaba con poca data de este indicador, se ha visto mayor conveniencia en presentar estos valores en la tabla del PPC recolectado durante la segunda etapa en el ítem 5.1.

#### **4.2.1.4 Cantidad de solicitudes de información (RFI's)**

Se considera importante enfatizar que, en las semanas iniciales de la ejecución de la obra, ya se contaba con un avance del modelo 3D de la especialidad de estructuras para la subestructura. El avance de este permitió que el ingeniero residente pudiese complementar algunos de sus RFI's con imágenes extraídas del modelo con la finalidad de que el proyectista entienda mejor su consulta. Mencionado esto, la oficina técnica había mandado 7 solicitudes de información hasta antes de que se inicie la adopción paulatina de VDC. Además, la latencia de respuesta variaba desde 1 a 23 días. A continuación, se presenta la tabla 6 en la cual se indica lo siguiente: el motivo y la información requerida para absolver la consulta; la fecha de cuándo fue mandada y respondida por el proyectista; la latencia de respuesta; y si el modelo 3D, elaborado hasta ese momento, fue útil para que se le advirtiese al ingeniero residente sobre algún problema en los planos 2D proporcionados y para que el proyectista tuviese mejor visualización y entendimiento acerca de qué se le estaba consultando.

**Tabla 6.** Desglose de la información referente a los RFI's

N° RFI	Descripción del problema	Solicitud	¿Identificada con el modelo?	¿Usó imágenes del modelo?	Fecha de consulta	Fecha de respuesta	Latencia de respuesta (días)
1	El <b>largo</b> de los estacionamientos ubicados al lado de la Av. Sucre debe ser de 5 m (según el plano de arquitectura), pero la viga VS-59 del sótano invade 0.25 m y las columnas invaden aún más este espacio.	Brindar información para replantear la distribución. <b>Especialidad: Est</b>	Sí	Sí	30/03/2021	9/04/2021	10
2	El <b>ancho</b> de los estacionamientos ubicados al lado de la Calle Bondy debe ser de 3 m (según el plano de arquitectura), pero la viga VS-56 del sótano invade 0.15 m este espacio, por lo que queda un ancho libre de 2.85 m.	Determinar si el ancho del estacionamiento puede ser 2.85 m, o si se debe replantear. <b>Especialidad: Arq</b>	Sí	Sí	30/03/2021	22/04/2021	23
3	En la factibilidad eléctrica, se menciona que las áreas de servidumbre deben ser de 3.00 x 3.50 m de área y de 5.00 m de altura libre para las maniobras; sin embargo, se detectó, que en el sótano 1, el ancho de la losa reduciría el espacio entre los muros de apoyo a 2.65 m (respecto a los 3 m indicados). Por otro lado, se detectó una interferencia en el techo del 1er piso que reduce la altura libre de 5.00 a 3.08 m.	Definir las dimensiones del área para la subestación. <b>Especialidad: Arq</b>	Sí	Sí	30/03/2021	31/03/2021	1
4	Incongruencia de las dimensiones señaladas entre los planos E-36 (corte 6-6) y E-04 (planta de cimentación) del cimiento ubicado entre los ejes E-I/6.	Definir ancho de cimiento <b>Especialidad: Est</b>	No	No	13/04/2021	25/04/2021	12
5	No se especifica el tipo ni el detalle del acero del muro de corte ubicado entre los ejes 5/C-D del sótano 3 en el corte 11-11 (Plano E-04 cimentación).	Brindar detalle de acero. <b>Especialidad: Est</b>	No	No	13/04/2021	18/04/2021	5
6	La nivelación de la vereda ubicada en la Av. Sucre tiene un desnivel de 0.42 m con respecto a ambos extremos. Debido a esta fuerte pendiente se tomó la decisión de que la losa de estacionamientos ubicada entre los ejes B-H/1-2 siga la misma pendiente; la losa pierde su apoyo en la viga antes del eje D. Se plantea como opción incrementar el peralte de viga.	Brindar detalle del cambio de acero en vigas para su rediseño o señalar si se puede aumentar "h" en 0.25 m con la misma cuantía. <b>Especialidad: Est</b>	Sí	Sí	13/04/2021	20/04/2021	7

7	La columna C-12 (0.80 x 0.30 m) ubicada en el eje B/6 (parte desde la cimentación hasta el techo del sótano 1) sobresale con un pinto de 7 cm respecto del muro del sótano. Para evitar problemas de modulación del encofrado, se solicita alinear dicha columna con el muro.	Evaluar un ancho de columna igual a 0.25 m y determinar si es necesario aumentar la longitud de esta.	No	No	26/04/2021	27/04/2021	1
---	---	---	----	----	------------	------------	---

**Especialidad: Est**

Fuente: Elaboración propia

Asimismo, se nos comentó que estos tipos de problemas fueron detectados con anticipación gracias a que el maestro de obra, el topógrafo y el ingeniero residente, ya sea grupalmente o cada uno por su lado, solían revisar los planos relacionados a los entregables de los siguientes días o semanas como una costumbre adquirida en sus años de experiencia.

#### 4.2.1.5 Objetivos del proyecto

El cliente comunicó que su objetivo como la de muchas otras empresas inmobiliarias era que la obra no tenga problemas de atrasos; es decir, que todos los trabajos se desarrollen dentro de los plazos establecidos y con los recursos pactados en el cronograma base para evitar pérdidas de dinero. Además, señaló que todos los entregables del proyecto debían pasar por controles de calidad. Otra de sus metas fue el aseguramiento de todas las medidas de seguridad correspondientes para proteger la vida y salud de los involucrados durante la ejecución de su proyecto. Finalmente, todos los participantes generaron compromisos para cumplir con dichos requerimientos.

## 4.2.2 Segunda etapa

Esta etapa inició cuando empezaron las actividades para la construcción de los muros anclados del segundo anillo (semana 15) y finalizó cuando se llegó al nivel 0 del edificio (semana 32). Durante estas 18 semanas, se realizó la implementación de la metodología propuesta.

### 4.2.2.1 Modelo 3D

El modelo 3D se elaboró a partir de los planos CAD. La creación de parámetros específicos para los elementos de concreto armado facilitó la definición de sus características. Además, permitieron la aplicación de filtros para mejorar la visualización del modelo y sirvieron para extraer la información necesaria de las tablas de planificación y cuantificación tanto de los elementos verticales (columnas y placas) como de los horizontales (losas macizas y vigas). Estos parámetros fueron los siguientes:

- Nivel del elemento: tenía como finalidad señalar la ubicación del elemento modelado. Los niveles del modelo corresponden a los propuestos en los planos de arquitectura.
- Sector: permitía asignar colores distintivos a los elementos de los sectores de cada nivel mediante la aplicación de filtros.
- Fase: sirvió para agrupar los elementos en subestructura y superestructura.
- Frente: se usó este parámetro para realizar la distinción entre los elementos verticales y horizontales de modo que se puedan obtener los metrados

agrupados según sea la categoría requerida. Lo cual fue de gran ayuda al momento de sectorizar el área de trabajo.

- Tipo de concreto: permitió identificar gráficamente los elementos según el diseño del concreto premezclado, así como también, sirvió para realizar el metrado desglosado según la resistencia a la compresión del concreto ( $f'c$ ).



**Figura 12.** Modelo 3D de la especialidad de estructuras

Fuente: Elaboración propia

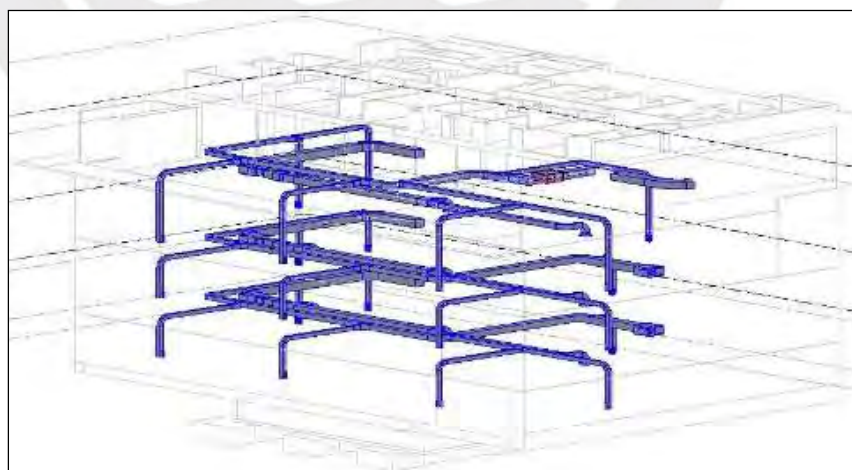
Gestionar adecuadamente la información del modelo permitió extraer los metrados de las principales partidas de la obra usando tan solo las tablas de cuantificación. Por ejemplo, se obtuvo que volumen total del concreto de la subestructura fue de  $520.88 \text{ m}^3$  y de dicho total  $398.47 \text{ m}^3$  correspondían a los muros anclados ( $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$ ) y  $122.41 \text{ m}^3$ , a los muros y columnas que estaban ubicados por debajo de la losa de transferencia del sótano 1 ( $f'c = 420 \text{ kg/cm}^2$ ). Además, mediante el uso de parametrización de elementos y aplicación de filtros, se realizó la distinción de las distintas resistencias del concreto del edificio por colores y el resultado final fue el siguiente:



**Figura 13.** Modelo 3D diferenciado según el tipo de concreto

Fuente: Elaboración propia

En cuanto al alcance del modelo 3D de la especialidad de instalaciones mecánicas para la subestructura, se modeló el sistema de extracción e inyección de monóxido y de aire, respectivamente. Asimismo, como se mencionó en la metodología, este se elaboró a partir del vínculo de la especialidad de estructuras como se muestra en la figura 14.



**Figura 14.** Modelo electromecánico de la subestructura

Fuente: Elaboración propia

De la misma forma, se modelaron las instalaciones sanitarias de la subestructura. El alcance de este comprende la representación de la red de agua (color azul), desagüe (color verde) y ACI (color naranja).



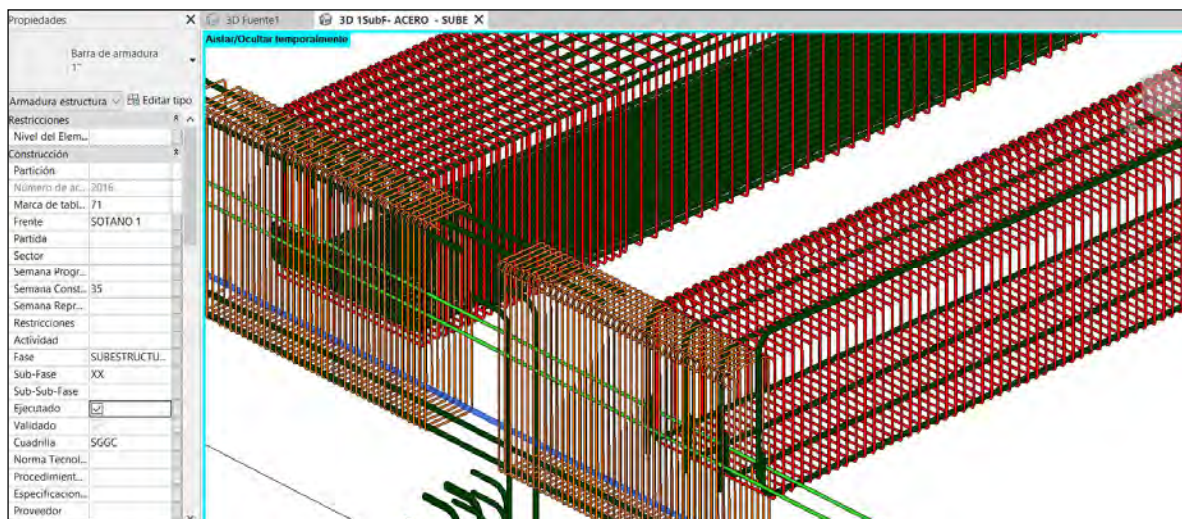
**Figura 15.** Modelo 3D de la especialidad de instalaciones sanitarias

Fuente: Elaboración propia

En particular, cabe resaltar que, por motivos operacionales, la empresa hasta la fecha de cierre (semana 32) no había definido a los subcontratistas de instalaciones electromecánicas ni del sistema contraincendios.

En lo referente al metrado de acero, para la etapa de presupuestación, este se realizó mediante estimaciones de ratio de material: a inicios de obra no se contaban con los metrados de acero reales del proyecto. Esto motivó a que se elabore el modelado del acero de la subestructura durante la etapa temprana del inicio de la excavación. En la siguiente figura, se indica los parámetros usados para identificar la información referente a la partida de acero en el modelo tal como qué contratista era el responsable de ejecutar la

actividad y durante qué semana. Con esta información se obtenía el sustento del metrado para la valorización presentada por los contratistas.



**Figura 16.** Modelo 3D del acero de refuerzo

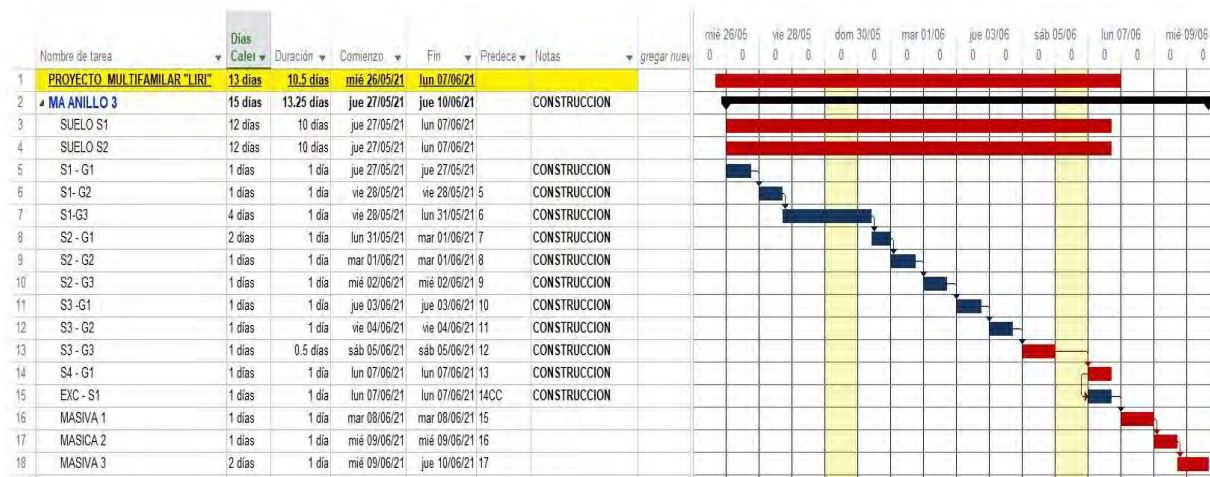
Fuente: Elaboración propia

#### 4.2.2.2 Modelado 4D

El modelo 4D del proyecto se desarrolló en base a los modelos 3D y a la información albergada en estos, ya que los parámetros designados a cada elemento (principalmente el denominado “sector”) fueron útiles para simular e iterar el proceso constructivo. Aparte de ello, otro dato de entrada fue la secuencia constructiva definida con los encargados de obra durante las reuniones colaborativas, la cual se plasmó a través de secuencias del tipo interdependientes en un diagrama de Gantt en el software *MS Project*. A continuación, se muestra el diagrama de Gantt elaborado para las actividades de un sector correspondientes a la ejecución del tercer anillo de los muros anclados (el cual incluye la cimentación perimetral) y parte de la

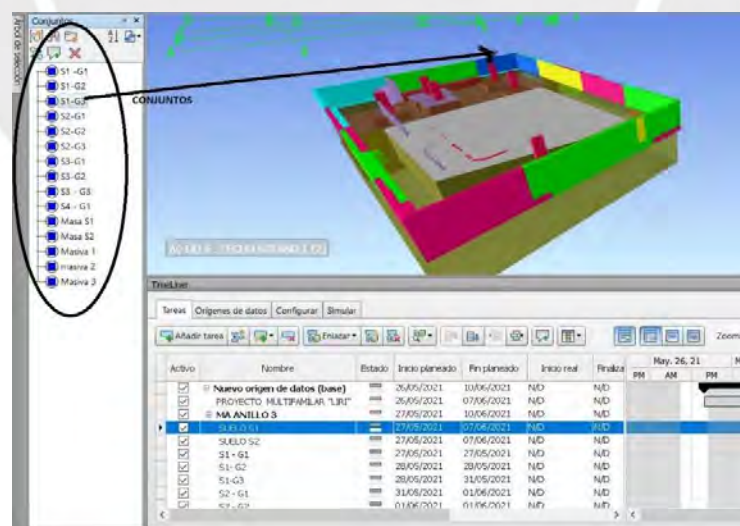


excavación de la cisterna (denominadas como masiva 1,2 y 3).



**Figura 17.** Diagrama de Gantt para la secuencia de actividades del anillo 3  
Fuente: Elaboración propia

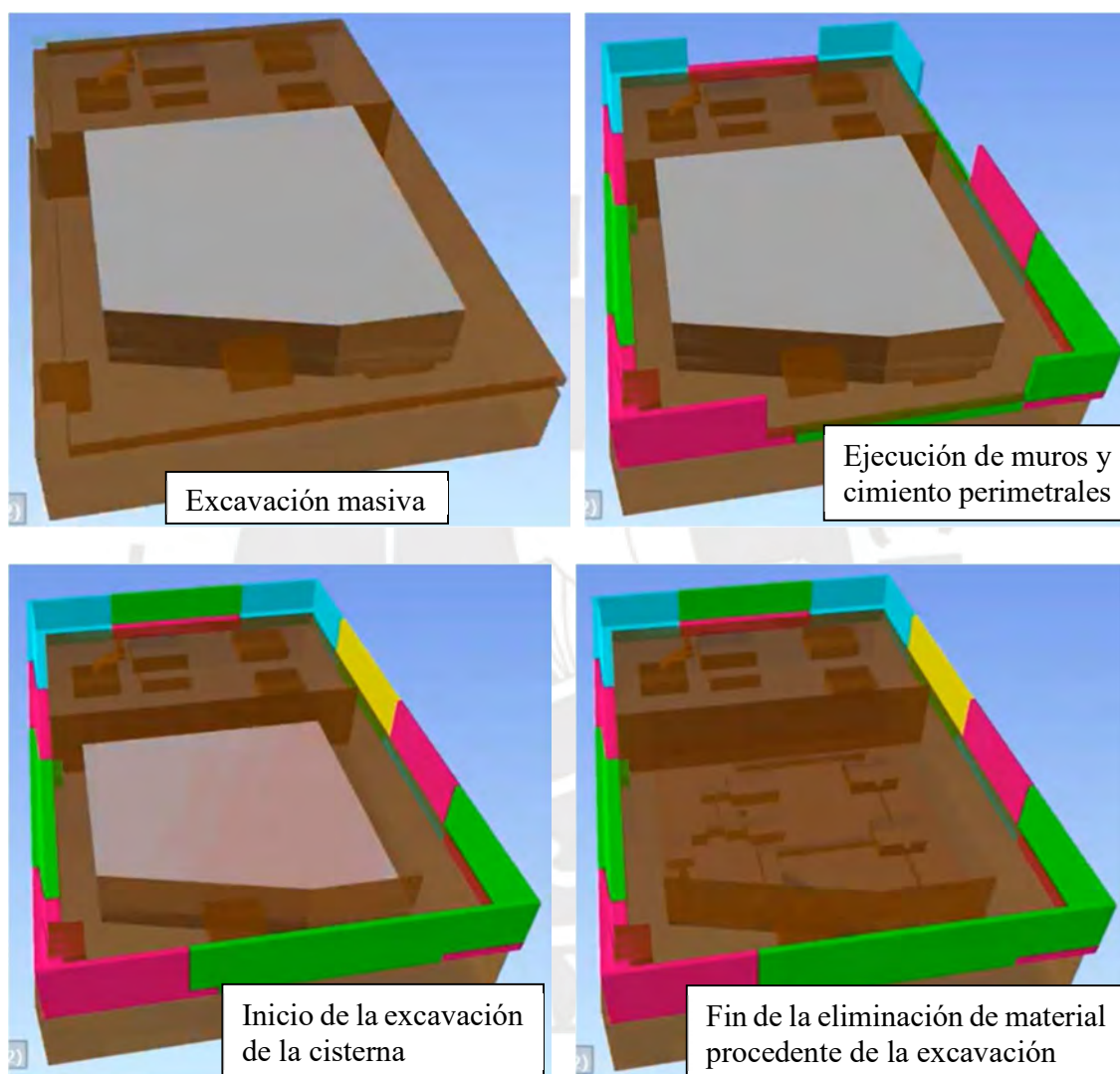
Una vez ya importado el modelo del *Revit* y el cronograma del *MS Project*, se enlazó la información proveniente de ambos softwares mediante la herramienta de conjuntos, la cual permitió agrupar los elementos según los parámetros señalados en el ítem 4.2.2.1.



**Figura 18.** Conjuntos creados para enlazar los elementos gráficos con la secuencia establecida en el cronograma.

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestra el proceso constructivo de los elementos del anillo 3 y la excavación de las cisternas. Los colores asignados a los muros no anclados y cimientos perimetrales indican la sectorización.



**Figura 19.** Secuencia de la construcción de los elementos del anillo 3 y de la excavación de las cisternas adaptado al proyecto LIRI.

Fuente: Elaboración propia

#### 4.2.2.3 Estructuración del trabajo

Se estructuró el trabajo en 2 etapas. La primera consistía en la

ejecución de los muros y la segunda en la construcción de las cimentaciones y los sótanos.

- Ejecución de muros anclados y no anclados del segundo y tercer anillo, respectivamente:

Se realizó una reunión previa con el staff de obra (ingeniero residente, ingeniero de producción, responsable de SSOMA, ingeniero de calidad, ingeniero de almacén), con los capataces de obra y con los subcontratistas de las partidas de acero, de excavación y movimiento de tierras, y de perforación, inyección y tensado de anclajes. Ello con la finalidad de definir los criterios y las actividades que permitiesen ejecutar los trabajos de manera segura y eficiente tal como se indica a continuación:

1. usar un  $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$  con resistencia a 24 horas para poder desencofrar los paños al día posterior y tensar el muro de modo que se optimice el uso del encofrado y se tenga mayor posibilidad de apertura de paños contiguos, y
2. revisar la propuesta de secuenciación de paños brindada por parte de la subcontrata de perforación, inyección y tensado de anclajes.

Estos criterios se complementaron con la visualización del producto y el metrado proporcionado por el modelo 3D para definir la sectorización de los muros. Se llegó a la conclusión de que los paneles prearmados con dimensiones fijas para el encofrado determinarían la cantidad de sectores, así como también que estos incrementarían la productividad debido a que

elimina directamente el trabajo contributorio de medir, cortar y armar el panel repetidas veces para las distintas dimensiones de los dameros.

o Construcción de las cimentaciones y los sótanos:

Se decidió abrir dos frentes de trabajo. El primero comprendía los trabajos por encima de la tapa de la cisterna y el segundo, los trabajos destinados a la construcción de la cisterna. Fue de gran utilidad simular la excavación de la cisterna, ya que permitió advertir que una vez iniciada esta actividad no se iba a poder usar la excavadora para los trabajos restantes del sótano 3. Frente a ello, se decidió dar prioridad a las actividades del nivel superior antes de iniciar la excavación de la cisterna para que evitar dejar trabajos sin culminar.

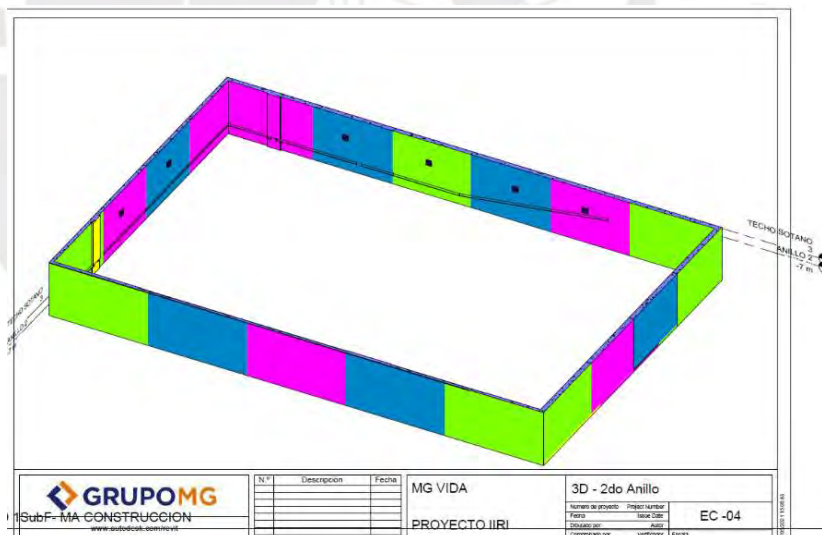
#### **4.2.2.4 Programación semanal**

La agenda de las reuniones colaborativas potenciadas con la componente ICE fue la siguiente:

- Informar sobre el estado de avance de la obra y las dificultades atravesadas durante la semana. Se complementa la exposición del ingeniero residente con vistas impresas del modelo 3D de lo construido hasta la fecha.
- Aportes y/o comentarios de los presentes.
- Presentación del *lookahead* y de la programación semanal sugerida por el ingeniero residente.

- Aportes y/o comentarios de los presentes para iniciar la identificación de restricciones y de incompatibilidades en equipo. Se complementa la discusión grupal con la proyección del modelo 3D y/o 4D.
- Compromisos para levantar las restricciones con anticipación
- Comentarios finales de la programación final por parte del ingeniero residente y del ingeniero de campo.

Las sugerencias a la programación de las actividades se simulaban en el modelo 4D mediante la herramienta *TimeLiner*. Una vez consensado el plan semanal, se preparaba vistas 3D de los sectores a ejecutarse. La siguiente figura muestra el entregable de una de las reuniones llevadas a cabo para planificar la construcción del segundo anillo.



**Figura 20.** Vista 3D de la planificación semanal de los muros anclados del 2do anillo.

Fuente: Elaboración propia

Con respecto a la ubicación espacial de los asistentes, se ordenaban

las sillas formando una medialuna, la cual propició la comunicación entre todos y la visualización directa hacia los modelos y la pizarra de apuntes.

Los participantes fueron los siguientes:

- ingeniero residente;
  - ingeniero de campo;
  - responsable de SSOMA;
  - capataces (topógrafo, acero, carpintería, II.SS., II.EE., albañilería y acabados);
  - subcontratas de acero y de excavación y movimiento de tierras.
- ingeniera de calidad;
  - ingeniero de almacén;
  - maestro general de obra;

Por último, el ingeniero de campo era el encargado de plasmar toda la información acordada durante la reunión en cuadros de Excel. La siguiente figura muestra el *lookahead* elaborado por el residente a partir de la reunión de planificación de la semana 27.

LAST PLANNER SYSTEM - LOOKAHEAD SEM		SEMANA 1					SEMANA 2					SEMANA 3						
		lun	mar	mié	jue	vie	lun	mar	mié	jue	vie	lun	mar	mié	jue	vie		
ITE	DESCRIPCION DE ACTIVIDADES																	
4.2	TREN DE VERTICALES SOTANO																	
4.2.1	TRAZO Y REPLANTEO DE COLUMNAS Y MUROS DE CONCR	S3S1	S3S2	S3S3	S3S4	S3S5	S3S1	S2S2	S2S3	S2S4	S2S5	S1S1	S1S2	S1S3	S1S4	S3S15		
4.2.2	COLOCACION DE ACERO DE COLUMNAS Y MUROS DE CON	S3S1	S3S2	S3S3	S3S4	S3S5	S3S1	S2S2	S2S3	S2S4	S2S5	S1S1	S3S12	S3S13	S3S14	S3S15		
4.2.3	IISS-IIIIEE DE COLUMNAS Y MUROS	S3S1	S3S2	S3S3	S3S4	S3S5	S2S1	S2S2	S2S3	S2S4	S2S5	S3S11	S3S12	S3S13	S3S14	S3S15		
4.2.4	ENCOFRADO Y DESENCOFRADO DE COLUMNAS Y MUROS		S3S1	S3S2	S3S3	S3S4	S3S5	S2S1	S2S2	S2S3	S2S4	S2S5	S3S11	S1S2	S1S3	S1S4		
4.2.5	COLOCADO DE CONCRETO EN COLUMNAS Y MUROS		S3S1	S3S2	S3S3	S3S4	S3S5	S2S1	S2S2	S2S3	S2S4	S2S5	S1S1	S1S2	S1S3	S1S4		
4.2.6	CURADO CON ADITIVO DE COLUMNAS Y MUROS			S3S1	S3S2	S3S3	S3S4	S3S5	S2S1	S2S2	S2S3	S2S4	S2S5	S1S1	S1S2	S1S3		
4.2.7	VERIFICACION DE CALIDAD DE VERTICALES			S3S1	S3S2	S3S3	S3S4	S3S5	S2S1	S2S2	S2S3	S2S4	S2S5	S1S1	S1S2	S1S3		
4.3	TREN DE HORIZONTALES SOTANO																	
4.3.1	ENCOFRADO DE FONDO DE VIGAS			S3S1	S3S2	S3S3	S3S4	S3S5	S2S1	S2S2	S2S3	S2S4	S2S5	S1S1	S1S2	S1S3		
4.3.2	ENCOFRADO DE COSTADOS INTERIORES DE VIGAS			S3S1	S3S2	S3S3	S3S4	S3S5	S2S1	S2S2	S2S3	S2S4	S2S5	S1S1	S1S2	S1S3		
4.3.3	COLOCACION DE ACERO DE VIGAS			S3S1	S3S2	S3S3	S3S4	S3S5	S2S1	S2S2	S2S3	S2S4	S2S5	S1S1	S1S2	S1S3		
4.3.4	ENCOFRADO DE FONDO DE LOSA MACIZA			S3S1	S3S2	S3S3	S3S4	S3S5	S2S1	S2S2	S2S3	S2S4	S2S5	S1S1	S1S2	S1S3		
4.3.5	TRAZO DE DUCTOS Y FRISOS			S3S1	S3S2	S3S3	S3S4	S3S5	S2S1	S2S2	S2S3	S2S4	S2S5	S1S1	S1S2	S1S3		
4.3.6	COLOCACION DE ACERO DE LOSA MACIZA			S3S1	S3S2	S3S3	S3S4	S3S5	S2S1	S2S2	S2S3	S2S4	S2S5	S1S1	S1S2	S1S3		
4.3.7	IIIEE / IISS EN LOSAS			S3S1	S3S2	S3S3	S3S4	S3S5	S2S1	S2S2	S2S3	S2S4	S2S5	S1S1	S1S2	S1S3		
4.3.8	ENCOFRADO DE COSTADOS EXTERIORES DE VIGAS			S3S1	S3S2	S3S3	S3S4	S3S5	S2S1	S2S2	S2S3	S2S4	S2S5	S1S1	S1S2	S1S3		
4.3.9	COLOCADO DE CONCRETO EN LOSAS MACIZAS Y VIGAS			S3S1	S3S2	S3S3	S3S4	S3S5	S2S1	S2S2	S2S3	S2S4	S2S5	S1S1	S1S2	S1S3		
4.3.10	CURADO DE LOSA DE CONCRETO					S3S1	S3S2	S3S3	S3S4	S3S5	S2S1	S2S2	S2S3	S2S4	S2S5	S1S1		
4.3.11	DESENCOFRADO DE COSTADOS DE VIGAS Y FRISOS					S3S1	S3S2	S3S3	S3S4	S3S5	S2S1	S2S2	S2S3	S2S4	S2S5	S1S1		
4.3.12	DESENCOFRADO DE FONDO DE VIGAS (DEJAR LLAVES)										S3S1	S3S2	S3S3	S3S4	S3S5	S2S1		
4.3.13	DESENCOFRADO DE LLAVES DE LOSA (DESAPUNTALAMIENTO)								1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Figura 21. Lookahead de la semana 27, 28 y 29

Fuente: GRUPO MG

#### 4.2.2.4.1 Análisis de restricciones

Se elaboró un formato en Excel para registrar ordenadamente las restricciones de las actividades programadas. Este consta de un *dashboard* principal en el que los datos de entrada están relacionados con la información de las actividades correspondientes a la semana de estudio tales como fecha de inicio de ejecución, fecha límite para el levantamiento de la restricción y el responsable asignado para este fin.

Durante el análisis, se tuvo en cuenta la evaluación de las restricciones relacionadas a mano de obra, materiales, equipos, información, trabajos previos, seguridad y condiciones externas. A continuación, se presenta el panel que se usó en las reuniones con las 7 pestañas que desglosan a mayor detalle cada una de las restricciones detectadas en las actividades planeadas.

DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES		FECHA: 17-Jul-21 al 24-Jul-21				SEMANA: SEMANA 23		MÍNIMO TOTAL DE RESTRICCIONES: 4		7 DE MAYAS RESTRICCIONES EN EL PLAN DE OBRAS POR SEMANA: 57.2%	
ANÁLISIS DE RESTRICCIONES - SEMANA 23		FECHA DE INICIO DE PLANEAJA		FECHA DE SOLICITADA DE IMPRESO		FECHA DE LEVANTAMIENTO DE RESTRICCIÓN		FECHA DE INICIO DE ACTIVIDAD		SEMANA 23	
Nº	ACTIVIDAD	FECHA DE INICIO DE PLANEAJA	FECHA DE SOLICITADA DE IMPRESO	FECHA DE LEVANTAMIENTO DE RESTRICCIÓN	FECHA DE INICIO DE ACTIVIDAD	MÁTRIZ DE RESTRICCIÓN		COMENTARIOS / PLAN DE ACCIÓN	SEMANAS LOOK AHEAD		
						ÁREA	RESPONSABLE		DÍAS HABILES	SEMANARIO	STATUS
SUBESTRUCTURA											
1	VAHADO DE CONCRETO MUROS ANCLADOS	25/07/2021	19/07/2021	23/07/2021	25/07/2021	PROO	GENCALDOLDAVZA	16	▲	PROCESO	Preparar el terreno para el ingreso de la perforadora en el día A.
2	COMPACTACIÓN Y NIVELACIÓN DE TERRENO	27/07/2021	19/07/2021	25/07/2021	27/07/2021	PROO	GENCALDOLDAVZA	18	◆	PENDIENTE	Enviar requerimiento de acero para muros.
3	REUBICACIÓN DE BAÑOS PROVISIONALES	28/07/2021	19/07/2021	26/07/2021	28/07/2021	PROO	GENCALDOLDAVZA	19	▲	PROCESO	Enviar correo en solicitud a Itali.
4	IZAJE DE MAQUINA PERFORADORA	28/07/2021	19/07/2021	24/07/2021	28/07/2021	SSOMA	ROBERTO VEGA	17	◆	PENDIENTE	Enviar requerimiento de acero para muros.
5	ELOCACIÓN DE VIGAS ESQUINERAS	25/07/2021	19/07/2021	23/07/2021	25/07/2021	SC	ALL TEPYAN	16	◆	PENDIENTE	
6											
7											
8											
9											
10											
11											
12											
13											
14											
ACABADOS SOTANOS											
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <span style="border: 1px solid red; border-radius: 50%; padding: 2px 5px;">1</span> <span style="border: 1px solid red; border-radius: 50%; padding: 2px 5px;">2</span> <span style="border: 1px solid red; border-radius: 50%; padding: 2px 5px;">3</span> <span style="border: 1px solid red; border-radius: 50%; padding: 2px 5px;">4</span> <span style="border: 1px solid red; border-radius: 50%; padding: 2px 5px;">5</span> <span style="border: 1px solid red; border-radius: 50%; padding: 2px 5px;">6</span> <span style="border: 1px solid red; border-radius: 50%; padding: 2px 5px;">7</span> </div>											

**Figura 22.** Registro de restricciones

Fuente: Elaboración propia

#### 4.2.2.4.2 Evaluación de reuniones

Se solicitó a los últimos planificadores evaluar las mejoras implementadas a las reuniones semanales. Este proceso se llevó a cabo a través de formularios *Plus/Delta* y de una breve encuesta conformada por 5 preguntas relacionadas a la validación de la sinergia entre las funcionalidades de VDC y los principios de LC señalada en el ítem 2.3.

- Plus/Delta:

Los formularios escaneados en el siguiente enlace corresponden a los rellenados durante las primeras semanas de la implementación:

<https://drive.google.com/drive/folders/1BbI9YY-EmmVlpLZF7Pml7VwflstjfiUW?usp=sharing>

#### FORMULARIO PLUS & DELTA

+ Es bueno el uso de los modelos, permite entender los problemas que pueden surgir, ayuda bastante a la visualización.  
 La reunión permite informarnos de cómo vamos todos y si la planificación ha mejorado.  
 Δ  
 Fomentar más la participación y hacer dinámica la reunión para que no sea tediosa.  
 Conseguir un proyector.

**Comentarios:**  
 La pizarra ayuda a recordar la información acordada toda la siguiente semana.

**Figura 23.** Formulario Plus/Delta extraído de la semana 21 de la obra  
 Fuente: Elaboración propia

En suma, la mayoría señaló que los modelos incrementaron



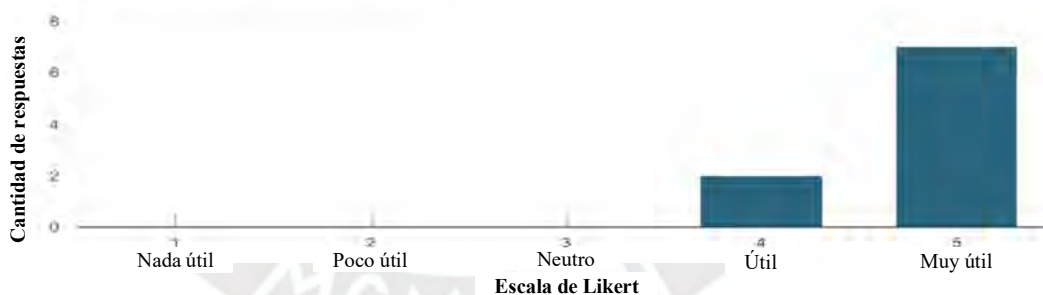
la visualización global proyecto y la coordinación de las actividades, así como también, que era necesario conseguir un proyector. Con respecto a esta última sugerencia, se debe resaltar que, para las semanas posteriores, se hizo uso de un proyector de gama media-baja adquirido por los tesistas.

- Encuesta:

Al término de la reunión de la semana 32, se brindó el formato indicado en el anexo 1. Se debe enfatizar que las respuestas varían en la escala de Likert, donde el valor de 1 es igual a nada útil y 5, a muy útil. A continuación, se presenta el gráfico de barras obtenido para cada pregunta.

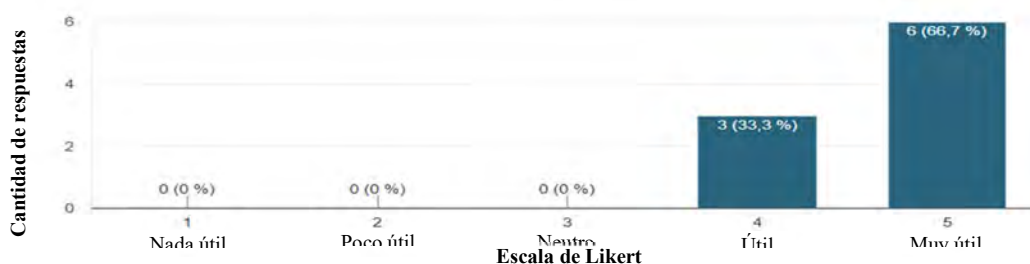
1. ¿Qué tan útil fue usar modelos virtuales del proyecto durante las reuniones colaborativas para mejorar la visualización del producto final?

9 respuestas



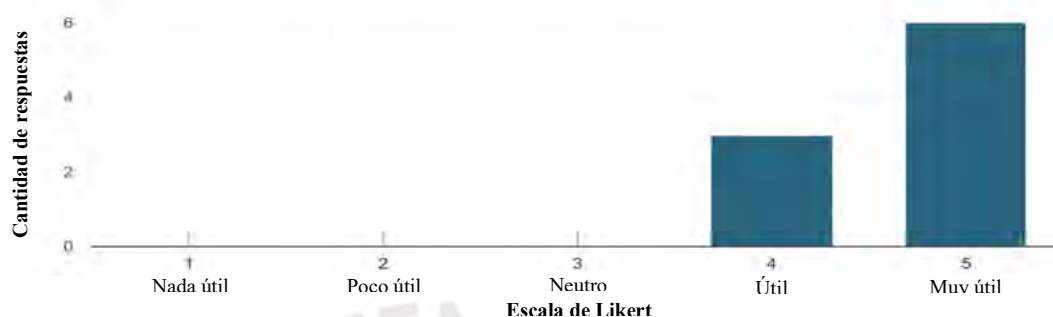
2. ¿Qué tan útil fue usar modelos virtuales del proyecto durante las reuniones colaborativas para mejorar el entendimiento de las actividades y procesos que se deben realizar para cumplir con la planificación semanal?

9 respuestas



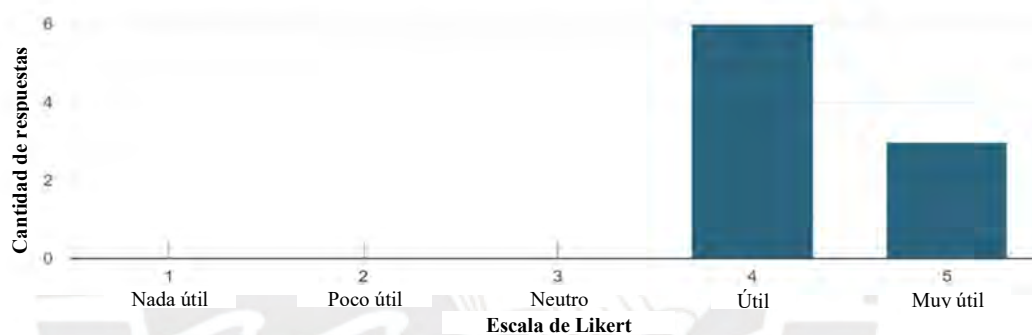
3. ¿Qué tan útil fue usar modelos virtuales del proyecto durante las reuniones colaborativas para mejorar la transparencia de las actividades y procesos relacionados a la ejecución de la obra?

9 respuestas



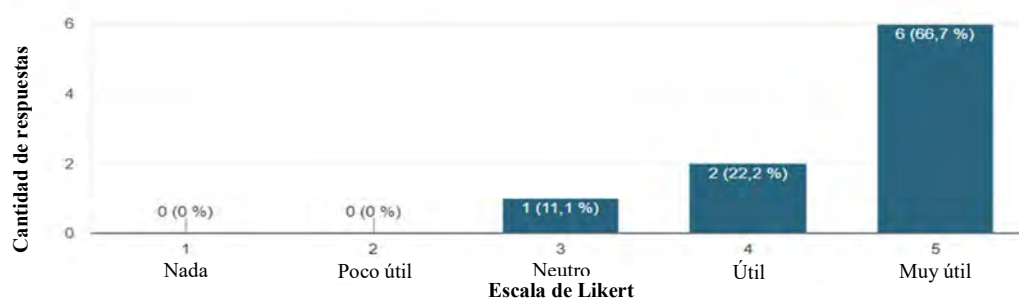
4. ¿Qué tan útil fue usar modelos virtuales del proyecto durante las reuniones colaborativas para reducir la variabilidad de las actividades y procesos durante la ejecución de la obra?

9 respuestas



5. ¿Qué tan útil fue usar modelos virtuales del proyecto durante las reuniones colaborativas para reducir el tiempo del ciclo requerido para la extracción de información tales como metrados, elevaciones de algún sector del plano, entre otros?

9 respuestas



**Figura 24.** Resultados de la encuesta realizada para validar sinergia entre las funcionalidades de VDC y los principios de LC.

Fuente: Elaboración propia

#### **4.2.2.5 Monitoreo y control de indicadores**

La información se recolectó durante el periodo comprendido de la semana 15 hasta la semana 32, tiempo durante el cual se implementaron las nuevas herramientas de monitoreo y control de la producción.

##### **4.2.2.5.1 Porcentaje de plan completado (PPC)**

Este indicador se midió semanalmente durante la ejecución de los muros de sostenimiento o anclados, la cimentación y la estructura de los sótanos. El valor del PPC meta u objetivo se consideró igual a 75%, debido a que la empresa aún no contaba con estándares de producción definidos a nivel de portafolio; es decir, en las diferentes obras que ejecutaron cada ingeniero residente definía el valor del PPC meta basados en su experiencia.

La medición del PPC inició a principios del mes de febrero del 2021 (semana 2 del cronograma de ejecución de la obra) y durante este período comprendido entre la semana 2 hasta la 14 casi el total de actividades estuvo dirigida a la culminación de la demolición de la estructura existente y a ejecución de las obras provisionales. En particular esta prolongación excesiva se debió a un par de paralizaciones de obra a causa de un incidente ocurrido durante la etapa inicial de la demolición. La tabla 7 muestra el alcance del monitoreo del PPC y los principales hitos de la fase de subestructuras del proyecto.

**Tabla 7.** Detalle general de las principales actividades desarrolladas durante las semanas de estudio.

<b>Actividades por semana</b>	
<b>Número de semana</b>	<b>Principales actividades</b>
Semana 02 - 14	
Semana 13	
Semana 14	Excavación masiva
Semana 15	
Semana 16	Primer anillo (muros anclados)
Semana 17	
Semana 18	
Semana 19	Segundo anillo (muros anclados)
Semana 20	
Semana 21	
Semana 22	Tercer anillo (muros de sostenimiento) / cimentación aislada / excavación
Semana 23	cisterna
Semana 24	
Semana 25	Cimentación de la cisterna
Semana 26	
Semana 27	Sótano 3
Semana 28	
Semana 29	Sótano 2
Semana 30	
Semana 31	Sótano 1
Semana 32	

Fuente: Elaboración propia

La figura 25 indica el formato establecido para llevar a cabo el control de las actividades completadas y no completadas de la semana 20. Durante esta semana, se había planeado ejecutar 36 actividades, sin embargo, solo se pudieron cumplir 30, por lo que el PPC correspondiente fue igual a 83%. Las causas por las que no se completaron fueron las siguientes: no se arregló a tiempo los equipos averiados y el proveedor de concreto premezclado

canceló el pedido sin previo aviso.

PLAN SEMANAL - PROYECTO LIRI		SEMANA 20						N ACTIV	SI	NO	TIPO	
		May 17	May 18	May 19	May 20	May 21	May 22					
ITEM	DESCRIPCION DE ACTIVIDADES	PAÑOS	lun	mar	mié	jue	vie	sáb				
<b>MA TREN DE MUROS ANCLADOS</b>												
<b>2.2 MUROS ANCLADOS</b>												
<b>SEGUNDO ANILLO</b>												
2.2.11	CORTE DE BANQUETA DE SEGURIDAD	m3	2MA-2.09 2MA-2.07	2MA-2.11 2MA-2.02	3MA-2.08 4M-2.05 4M-2.06	4M-2.07 4M-2.08	4M-2.01 4M-2.02		5	4	1	PROG
2.2.12	PERFILADO Y PANETEO DE MURO	m2	2MA-2.09 2MA-2.07	2MA-2.11 2MA-2.02	3MA-2.08 4M-2.05 4M-2.06	4M-2.07 4M-2.08	4M-2.01 4M-2.02		5	4	1	EJEC
2.2.13	COLOCADO DE ACERO EN MURO	kg	2MA-2.09 2MA-2.07	2MA-2.11 2MA-2.02	3MA-2.08 4M-2.05 4M-2.06	4M-2.07 4M-2.08	4M-2.01 4M-2.02		5	5	0	PROG
2.2.14	ENCOFRADO DE MURO	m2	1MA-2.10 3MA-2.03	2MA-2.05 2MA-2.07	2MA-2.11 2MA-2.02	3MA-2.08 4M-2.05 4M-2.06	4M-2.07 4M-2.08		5	5	0	PROG
2.2.15	CONCRETO DE MURO (F C= 300Kg cm2)	m3	1MA-2.10 3MA-2.03	2MA-2.05 2MA-2.07	2MA-2.11 2MA-2.02	3MA-2.08 4M-2.05 4M-2.06	4M-2.07 4M-2.08		5	3	2	PROG
2.2.16	DESENCOFRADO Y CURADO DE MURO	m3	1MA-2.10 3MA-2.03	2MA-2.05 2MA-2.07	2MA-2.11 2MA-2.02	3MA-2.08 4M-2.05 4M-2.06	4M-2.07 4M-2.08		5	5	0	PROG
2.2.17	PICADO DE CACHIMBAS	m2	1MA-2.07 1MA-2.04	3MA-2.08 3MA-2.03	3MA-2.11 3MA-2.03	2MA-2.09 2MA-2.07	2MA-2.11 2MA-2.02		4	2	2	EQ
	TENSADO DE ANCLAJE	und				2MA-2.09 2MA-2.07	2MA-2.11 2MA-2.02		2	2	0	
									36.00	30	6	
									83.3%			

**Figura 25.** Actividades completadas y no completadas de la semana 20.

Fuente: Elaboración propia

#### 4.2.2.5.2 Ratio unitario de productividad (RUP)

El estudio relacionado a la productividad se centró en analizar el comportamiento de los indicadores o también denominados ratios de productividad relacionada a la mano de obra. Se decidió limitar la evaluación a la partida de carpintería, debido a que esta era la que más incidía en los costos de mano de obra de la fase de subestructura. Se debe resaltar que la empresa no monitoreaba la mano de obra consumida en ninguna de las partidas de control (PC), por lo que, en coordinación con los encargados de las cuadrillas, se desarrolló e implementó el siguiente formato de tareas diarios.

TAREO JORNAL DIARIO - LIRI - CARPINTERIA												
Fecha:												
ENCARGADO:												
Codigo	Obrero	Cuadri Ila	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	TOTAL	
012	TAFUR LUNA, EMILIANO MARCEL	1										
013	CHOQUE CONDORI, BENJAMIN	2										
014	JANAMPA RODRIGUEZ, DAYLE AILIPIO	3										
010	JESUS VILLAR, DAVID ANGEL	4										
011	MOSCOSO GARCIA, MAX JULIO	5										
022	TAFUR SINCHE, FRANCISCO ANTONIO	6										
026	PURCA BUITRON EDEN GROVER	7										
027	VILLEGAS CIPRIAN BERNABE	8										
020	FLORES MORAN, CARLOS	9										
028	ARELLAN TAFUR, ABEL FRANCO	10										
029	SANCHEZ DIAZ, JESUS ANDRES	11										
033	ARELLAN TAFUR, GILVER ESTEBAN	12										
034	CHUQUI URIBE, MAMANI	13										
-		14										
			PC				PC					
		A1	3.05	Encofrado - Cimentaciones			A5	3.03	Concreto - Elementos Verticales			
		A2	3.06	Encofrado - Elementos Verticales			A6	1.04	Relleno y perfilado (transportes, techos, vertical, horizontal, izaje, montaje, etc.)			
		A3	3.07	Encofrado - Elementos Horizontales			A7	1.07				
		A4	1.01	Trabajos Preliminares y Provisionales			A8		Bonificacion por tarea			

**Figura 26.** Ejemplo de formato para el tareo diario.

Fuente: Elaboración propia

Gracias a ello, el capataz de carpintería registraba, organizadamente, la cantidad de horas hombre diarias consumidas por sus trabajadores en cada una de las partidas de control. Se encontró que dicho valor era variable, debido a que había días en los que algunas personas faltaban o se encontraban suspendidas, o porque, simplemente, las actividades planeadas para dicho día no ameritaban la presencia completa de todo el personal de la partida para su ejecución.

Una vez identificada la cantidad de HH, lo siguiente era determinar el metrado realizado de cada partida durante ese día, para lo cual se usó el modelo 3D y el complemento adquirido llamado “*Dynamic Quantities V.3.5.0*”. Dentro del software *Revit*, se seleccionaba manualmente los elementos del modelo que habían sido ejecutados durante la jornada diaria y el

complemento se encargaba de brindar automáticamente los metrados correspondientes al concreto y encofrado. Otra forma de obtener esto era mediante el uso de tablas de cuantificación.

Finalmente, la información de HH y metrado ejecutado de los muros de sostenimiento se plasmaban en un formato como se muestra en la siguiente figura:

FECHA	SEMANA	ELEMENTO	UBICACION	NIVEL	RUPPresia	Día	METRADO EJECUTADO	HH META	HH reales	RUP/día	RUP/acum	RUP/acumProm
15/04/2021	SEMANA 15	MURO ANCLADO MA-01	E/E G-F/1	1ER ANILLO	1.18	1	10.85	19.88	42.5	2.522	2.522	2.522
16/04/2021	SEMANA 15	MURO ANCLADO MA-03	E/E E-D/1	1ER ANILLO	1.18	2	14.44	20.64	26.87	1.215	5.737	1.869
18/04/2021	SEMANA 15	MURO ANCLADO MA-06	E/E 3-S/A	1ER ANILLO	1.18	3	18.07	21.32	21.25	1.176	4.913	1.658
19/04/2021	SEMANA 16	MURO ANCLADO MA-08	E/E 3-S/A	1ER ANILLO	1.18	4	18.67	23.15	21.25	1.083	5.996	1.498
19/04/2021	SEMANA 16	MURO ANCLADO MA-11	E/E 3-S/A	1ER ANILLO	1.18	5	8.2	9.68	21.25	2.591	6.588	1.718
20/04/2021	SEMANA 16	MURO ANCLADO MA-10	E/E E-F/6	1ER ANILLO	1.18	6	19.59	23.12	42.5	2.169	10.757	1.793
21/04/2021	SEMANA 16	MURO ANCLADO MA-02	E/E E-F/1	1ER ANILLO	1.18	7	19.5	23.01	14.17	0.727	11.484	1.641
21/04/2021	SEMANA 16	MURO ANCLADO MA-13	E/E 3-2/1	1ER ANILLO	1.18	8	8.24	9.72	14.17	1.720	13.204	1.650
21/04/2021	SEMANA 16	MURO ANCLADO MA-05	E/E 3-2/A	1ER ANILLO	1.18	9	17.84	20.46	14.17	0.817	14.021	1.558
22/04/2021	SEMANA 16	MURO ANCLADO MA-09	L/E 1-1/6	1ER ANILLO	1.18	10	19.42	22.92	14.17	0.730	14.750	1.475
22/04/2021	SEMANA 16	MURO DE SOSTENIMIENTO IMS-05	E/E 5-5/F	1ER ANILLO	1.18	11	8.06	9.31	14.17	1.758	16.508	1.501
22/04/2021	SEMANA 16	MURO DE SOSTENIMIENTO IMS-06	L/E 4-3/1	1ER ANILLO	1.18	12	8.06	9.51	14.17	1.758	18.267	1.522
23/04/2021	SEMANA 16	MURO DE SOSTENIMIENTO IMS-07	ENTRE 1-2/1	1ER ANILLO	1.18	13	18.06	18.95	21.25	1.323	19.590	1.507
23/04/2021	SEMANA 16	MURO ANCLADO MA-07	ENTRE C-D/6	1ER ANILLO	1.18	14	14.87	17.55	21.25	1.429	21.019	1.501
26/04/2021	SEMANA 17	MURO DE SOSTENIMIENTO IMS-04	ENTRE H-1/6-5	1ER ANILLO	1.18	15	26.4	42.95	21.25	0.384	21.403	1.440
26/04/2021	SEMANA 17	MURO DE SOSTENIMIENTO IMS-08	ENTRE H-1/1-2	1ER ANILLO	1.18	16	17.72	25.27	21.25	1.078	22.480	1.418
27/04/2021	SEMANA 17	MURO ANCLADO MA-04	ENTRE B-C/6	1ER ANILLO	1.18	17	17.79	20.95	21.25	1.197	23.677	1.405
27/04/2021	SEMANA 17	MURO DE SOSTENIMIENTO IMS-03	ENTRE D-C/6	1ER ANILLO	1.18	18	9.81	11.58	21.25	2.166	25.843	1.447
28/04/2021	SEMANA 17	MURO DE SOSTENIMIENTO IMS-02	ENTRE 5-6/A-B	1ER ANILLO	1.18	19	22.52	38.87	21.25	0.653	26.497	1.405
29/04/2021	SEMANA 17	MURO DE SOSTENIMIENTO IMS-01	ENTRE A-B/1-2	1ER ANILLO	1.18	20	41.42	48.88	21.25	0.513	27.010	1.360
12/05/2021	SEMANA 19	MURO ANCLADO ZMA-06	ENTRE ENTRE 3-5/1	2DO ANILLO	1.18	21	18.59	21.94	21.25	1.143	28.153	1.350
12/05/2021	SEMANA 19	MURO ANCLADO ZMA-05	ENTRE C-D/6	2DO ANILLO	1.18	22	18.59	21.94	21.25	1.143	29.296	1.341
13/05/2021	SEMANA 19	MURO ANCLADO ZMA-08	ENTRE D-E/6	2DO ANILLO	1.18	23	18.59	21.94	21.25	1.143	30.439	1.332
13/05/2021	SEMANA 19	MURO ANCLADO ZMA-11	ENTRE 3-2/1	2DO ANILLO	1.18	24	18.59	21.94	21.25	1.143	31.582	1.324
14/05/2021	SEMANA 19	MURO ANCLADO ZMA-01	ENTRE H-F/1	2DO ANILLO	1.18	25	18.59	21.94	21.25	1.143	32.725	1.317
14/05/2021	SEMANA 19	MURO ANCLADO ZMA-03	ENTRE D-C/1	2DO ANILLO	1.18	26	20.88	24.64	21.25	1.018	33.743	1.306

**Figura 27.** Formato implementado para determinar el RUP

Fuente: Elaboración propia

A partir de la información de las columnas señaladas en la figura, se calculó el ratio de productividad diario de cada actividad y a su vez los ratios acumulados. Estos últimos permitieron identificar la tendencia que seguía el RUP a lo largo de días y semanas.

#### 4.2.2.5.3 Cantidad de solicitudes de información (RFI' s)

Durante este periodo, se mandaron **5** solicitudes de información. Estas tuvieron una latencia de respuesta variable

entre 1 a 12 días. Además, en 4 de estos documentos se incluyó imágenes y cortes extraídos del modelo para mejorar la comunicación del problema al proyectista revisor. Este aporte fue relevante, ya que los proyectistas señalaron que ello facilitó el entendimiento del problema, lo cual les permitió resolverlas en cuestión de pocos días. La siguiente tabla presenta a mayor detalle los RFI's mandados.

**Tabla 8.** Desglose de información referente a los RFI's de la segunda etapa

N° RFI	Descripción	Consulta	¿Identificada con el modelo?	¿Usó imágenes del modelo?	Fecha de consulta	Fecha de respuesta	Latencia de respuesta (días)
1	El corte 3-3 muestra el detalle de acero de refuerzo de los muros de sostenimiento de los ejes 1 y A, pero no muestra nada con respecto a la cimentación corrida de 0.50 x 0.50 m.	Brindar el detalle del acero de refuerzo o en su defecto <b>confirmar</b> si la cimentación corrida no lo requiere. <b>Especialidad: Est</b>	No	No	20/05/2021	21/05/2021	1
2	La rampa de acceso al sótano 1 (entre los ejes 2-4/H-I) no tiene apoyo en el margen izquierdo de su recorrido. Se plantea generar un apoyo variable entre los ejes 2-4 (ver anexo elemento en rojo).	Brindar el detalle estructural y <b>confirmar</b> si se acepta el planteamiento propuesto en obra; caso contrario, plantear alternativas de apoyo para dicho tramo de la rampa. <b>Especialidad: Est</b>	Sí	Sí	1/07/2021	6/07/2021	5



3	La viga VS1-24 (h=0.70 m) invade el giro de la rampa de acceso a los estacionamientos. ¿Puede disminuirse en 0.20 m su altura? Confirmar si el acero de la viga se mantiene o si se necesita un refuerzo.	Brindar el nuevo desarrollo de la viga VS-24. <b>Especialidad: Est</b>	Sí	Sí	6/08/2021	9/08/2021	3
4	Se ha detectado una grave incompatibilidad entre el banco de medidores N°02 y la losa de transferencia (VS1-49). En esta, están ubicadas casi la mitad de los alimentadores de dicho banco según lo que indica el plano.	Brindar información suficiente para poder reubicar esa parte del banco o hacer un murete en la rampa de ingreso. <b>Especialidad: II.EE.</b>	No	Sí	16/08/2021	28/08/2021	12
5	Se tiene que una parte del banco de medidores embebidos en el muro estructural tipo M7 (cuya área de ocupación es de 3.35 m <sup>2</sup> ) están en la ubicación que le corresponde a una columna y a parte de la malla.	Replantear la posición del banco, porque su ubicación actual ocasiona una debilitación en la zona del muro M7, el cual está forma parte de todos los pisos del edificio. <b>Especialidad: II.EE.</b>	No	Sí	17/08/2021	29/08/2021	12

Fuente: Elaboración propia

#### 4.2.2.5.4 Número de interferencias detectadas (BIM)

Usando la herramienta “*clash detective*”, se ha identificado **486** incompatibilidades entre los elementos de las especialidades de estructuras, sanitarias y mecánicas. Se realizó un recorrido virtual a través de los 3 sótanos y los problemas más resaltantes fueron los múltiples choques entre la tubería de ACI con los ductos de ventilación y con la tubería de desagüe colgada en el 1<sup>er</sup> sótano, así como también, la necesidad de pases de viga para las distintas tuberías. Cabe resaltar que, hasta la fecha de hasta la

fecha de cierre (semana 32), aún no se han solucionado las interferencias presentadas entre las I.I.M.M. y los tubos de ACI, ya que, como se mencionó en el ítem 4.2.2.1, la empresa aún no definía a los subcontratistas de estas especialidades por lo tanto no se pudo monitorear desempeño de las sesiones colaborativas para el levantamiento de las interferencias.



**Figura 28.** Interferencias más recurrentes

Fuente: Elaboración propia

#### 4.2.2.5.5 Reducción del tiempo para ejecutar los metrados

Se realizó un ensayo para comparar el tiempo requerido para metrar los elementos y la precisión obtenida usando el complemento en el modelo 3D y mediante el proceso de metrado tradicional realizado con planos CAD. Para ello, se realizó un esquema simple (figura 29) de los elementos verticales de la planta típica de la superestructura, en *AutoCad 2020*. A los

participantes, se les indicó que metrasen el volumen de concreto y el área de encofrado de los muros de concreto armado ( $h = 2.40$  m) de los 4 sectores definidos y a su vez que cronometrasen el tiempo invertido en cada uno de dichos sectores para finalmente rellenar el formato de la figura 30.



**Figura 29.** Plano adaptado para el ensayo desarrollado

Fuente: Elaboración propia

NOMBRE			Cargo:		
<b>Metrado elementos verticales - Planta típica</b>					
	Encofrado ( m2)	Volumen ( m3)	Hora inicio (min)	Hora fin (min)	tiempo invertido
<b>Sector 1</b>					
<b>Sector 2</b>					
<b>Sector 3</b>					
<b>Sector 4</b>					
* Se debe metrar los elementos considerando altura de piso a fondo de techo 2.4m					

**Figura 30.** Formato brindado a cada participante

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se midió el tiempo para extraer los mismos metrados mediante el uso del complemento y el modelo 3D. Estos

valores fueron la base para comparar los resultados obtenidos por los participantes y se presentan a continuación:

**Tabla 9.** Valores base para comparar el metrado y tiempo invertido en este proceso

<b>Metrado elementos verticales línea base – Liri</b>					
	Encofrado (m <sup>2</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )	Hora inicio (min)	Hora fin (min)	Tiempo invertido (min)
<b>Sector 1</b>	322.38	26.84	12:05:00	12:07:00	00:02:00
<b>Sector 2</b>	219.12	15.16	12:08:00	12:09:00	00:01:00
<b>Sector 3</b>	357.19	23.75	12:09:00	12:10:00	00:01:00
<b>Sector 4</b>	213.95	14.13	12:10:00	12:11:00	00:01:00

Fuente: Elaboración propia

#### 4.2.2.5.6 Medición del desperdicio de concreto

Dado que los otros proyectos de la empresa no contaban con información de los volúmenes de desperdicios de concreto en la fase de subestructuras no se podía realizar el análisis comparativo acerca de la reducción de dicho desperdicio. Por lo tanto, se decidió extraer esta métrica durante la etapa de la superestructura en coordinación con el residente y el ingeniero de producción de otro proyecto de la misma empresa denominado Pinos 3, el cual se ejecutaría un par de meses después. Cabe mencionar, que el cliente decidió que también se usaría modelos 3D para la fase de superestructuras de dicho proyecto y se tendrían en cuenta las lecciones aprendidas del presente proyecto denominado Liri.

## Capítulo 5. Análisis y discusión de resultados

### 5.1 Análisis del porcentaje de plan completado (PPC)

A continuación, se muestra el PPC del periodo comprendido entre la semana 2 y 32.

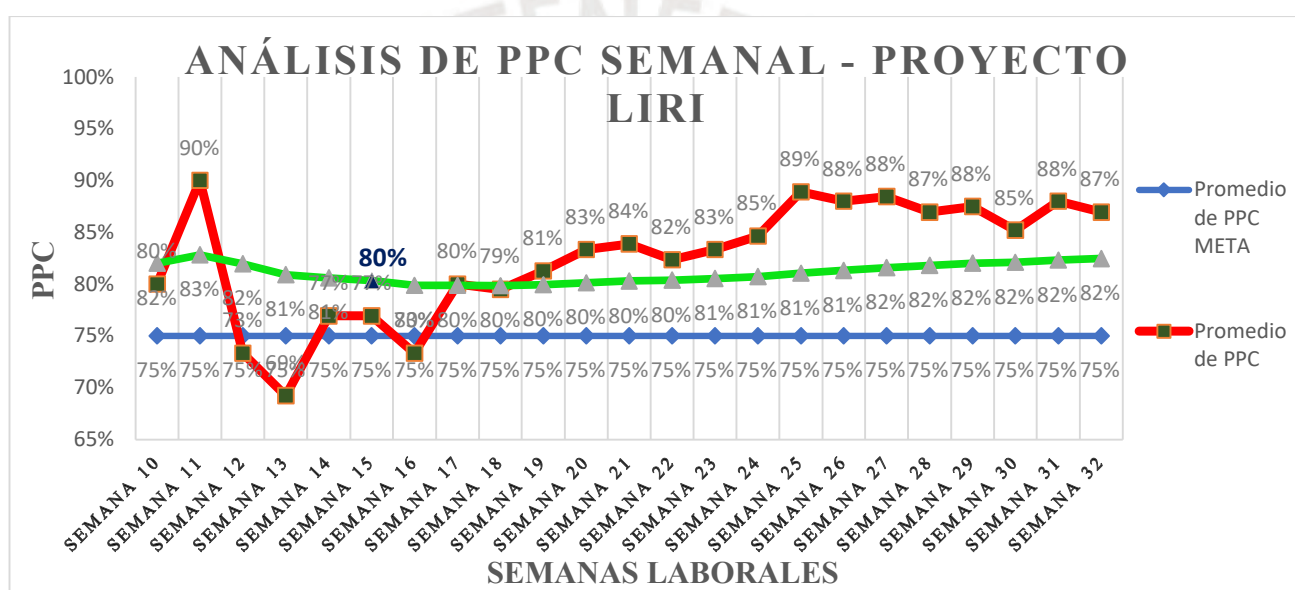
**Tabla 10.** Resultados del PPC obtenido desde la semana 2 hasta la 32.

Porcentaje de Plan Completado (PPC)							
Nº	Semana	Total de actividades	Actividades cumplidas	Actividades no cumplidas	PPC meta	PPC	% PPC acumulado
1	Semana 02	10	8	2	75%	80%	80%
2	Semana 03	11	9	2	75%	82%	81%
3	Semana 04	12	9	3	75%	75%	79%
4	Semana 05	10	9	1	75%	90%	82%
5	Semana 06	10	9	1	75%	90%	83%
6	Semana 07	10	8	2	75%	80%	83%
7	Semana 08	7	5	2	75%	71%	81%
8	Semana 09	10	9	1	75%	90%	82%
9	Semana 10	10	8	2	75%	80%	82%
10	Semana 11	10	9	1	75%	90%	83%
11	Semana 12	15	11	4	75%	73%	82%
12	Semana 13	13	9	4	75%	69%	81%
13	Semana 14	13	10	3	75%	77%	81%
14	Semana 15	39	30	9	75%	77%	80%
15	Semana 16	30	22	8	75%	73%	80%
16	Semana 17	40	32	8	75%	80%	80%
17	Semana 18	39	31	8	75%	79%	80%
18	Semana 19	32	26	6	75%	81%	80%
19	Semana 20	36	30	6	75%	83%	80%
20	Semana 21	31	26	5	75%	84%	80%
21	Semana 22	34	28	6	75%	82%	80%
22	Semana 23	30	25	5	75%	83%	81%
23	Semana 24	26	22	4	75%	85%	81%
24	Semana 25	27	24	3	75%	89%	81%
25	Semana 26	25	22	3	75%	88%	81%
26	Semana 27	26	23	3	75%	88%	82%
27	Semana 28	23	20	3	75%	87%	82%
28	Semana 29	24	21	3	75%	88%	82%
29	Semana 30	27	23	4	75%	85%	82%

30	Semana 31	25	22	3	75%	88%	82%
31	Semana 32	23	20	3	75%	87%	82%

Fuente: Elaboración propia

La figura 31 muestra el gráfico de la evolución del PPC<sub>acumulado</sub> (curva verde). Los picos de la línea roja representan la variabilidad en los compromisos asumidos semana a semana y la línea base de color azul nos indica el PPC meta semanal adoptado a lo largo del desarrollo del proyecto.



**Figura 31.** Gráfico del PPC del proyecto

Fuente: Elaboración propia

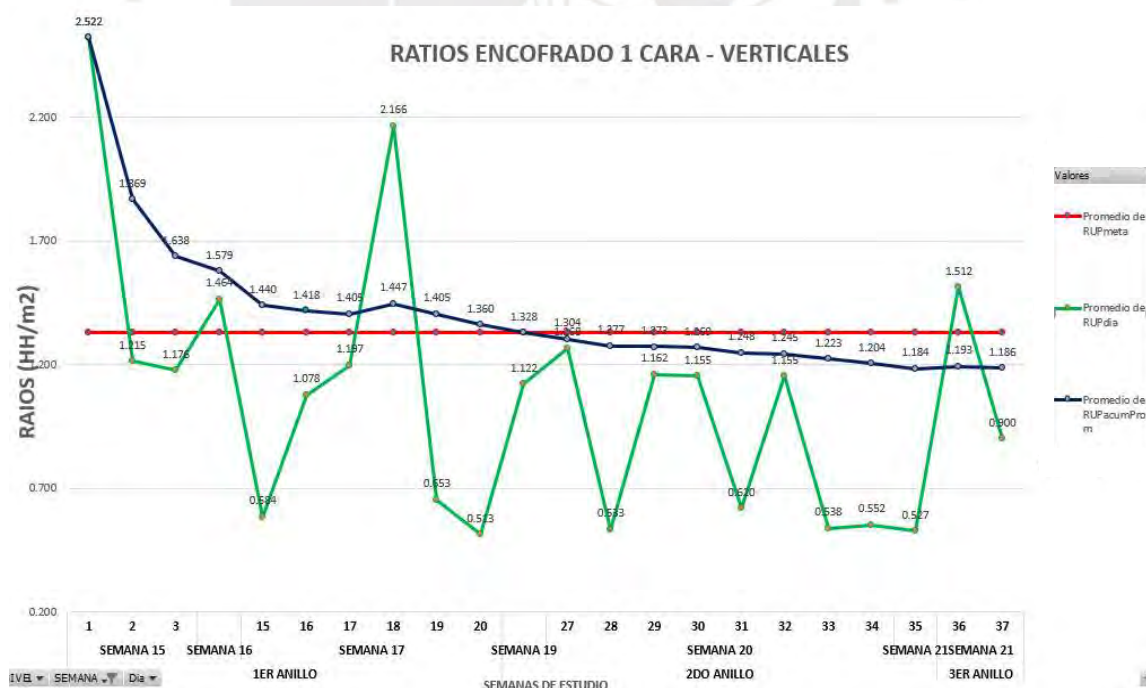
Se analizaron las siguientes características de la tabla y la gráfica:

- Durante las semanas 12-15 en las cuales se desarrolló la excavación masiva a nivel de corte de banquetas y perforación inicial, la gráfica muestra PPC's cercanos al meta siendo 69% el valor más bajo, el cual se debió a las fallas de la excavadora y al reducido espacio con el que se contaba para la ejecución de las actividades diarias.
- La tendencia decreciente del PPC de la semana 11 a la semana 18 se debe a que el PPC semanal era casi similar al PPC meta.

- El uso de los modelos 3D y 4D para planificar las actividades semanales y facilitar el entendimiento de los planos tuvo una influencia positiva en el PPC, ya que desde la semana 18 el PPC tuvo estuvo por encima del valor meta y mantuvo una tendencia casi constante de crecimiento sobre el **80%**. Asimismo, haber mejorado el análisis de restricciones ha logrado mitigar la variabilidad inherente a las actividades planificadas lo cual se ve traducido en la disminución de los picos de la curva roja.
- Debido a la tendencia positiva del PPC<sub>acum</sub>, los ingenieros decidieron ajustar el PPC meta a 80% u 85% para las semanas posteriores.

## 5.2 Análisis de productividad de mano de obra

- La figura 32 muestra los ratios diarios y semanales de la partida de encofrado a una cara de los muros de sostenimiento activo y pasivo de los sótanos.



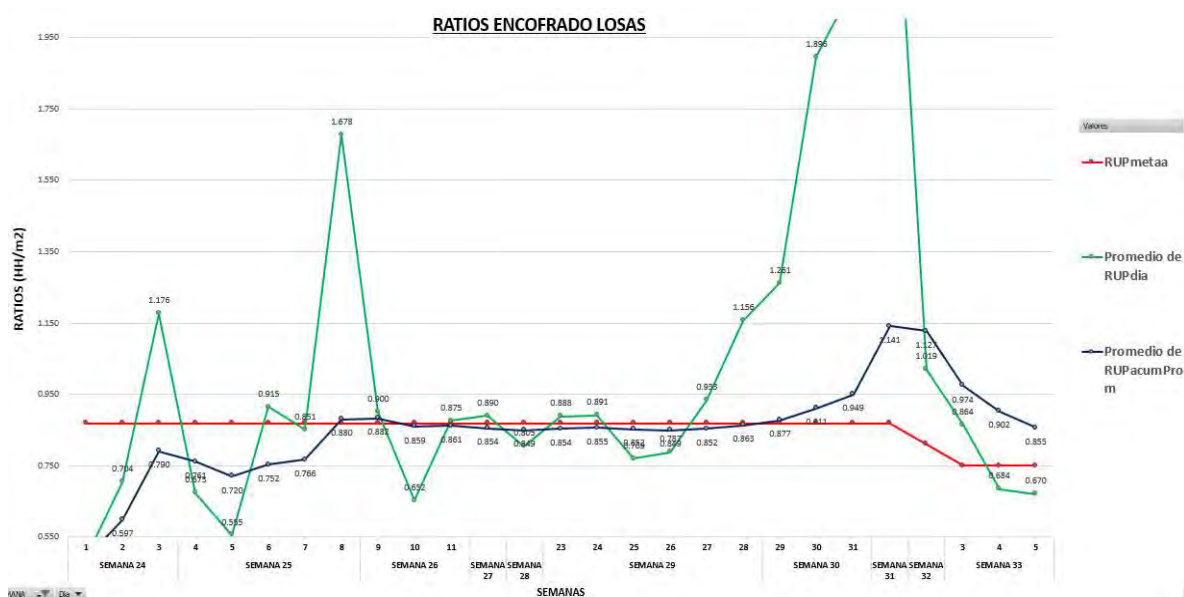
**Figura 32.** RUP de mano de obra de la partida de carpintería de los muros de los 3 anillos  
Fuente: Elaboración propia

La curva verde indica los índices de productividad diarios de las actividades de carpintería destinadas a la ejecución de los muros anclados del sótano 1 y 2 y del muro de sostenimiento del sótano 3. Esta curva presenta una tendencia fluctuante en el día a día, debido a la variabilidad de metrado presente sobre todo en el primer anillo, en el que los anchos de los paños de los muros de sostenimiento son bastante variables; esto genera que el ratio de un día sea muy distinto al de otro día a pesar de que se consuman las mismas HH.

Por otro lado, línea roja indica el RUP meta igual a  $1.33 \frac{HH}{m^2}$ , el cual se determinó como dato de entrada del proyecto de acuerdo con la experiencia en proyectos similares. Por último, la curva azul señala la tendencia del ratio acumulado. De esta línea, se puede deducir visualmente que la curva de aprendizaje del personal obrero comienza a asentarse a partir del segundo anillo, lo cual indica que todos ellos ya han adquirido mayor habilidad en el desarrollo de sus labores y, por ende, estas se realizan en menor tiempo. Asimismo, durante las últimas semanas, se puede apreciar que el  $RUP_{acum}$  disminuye por debajo del meta y de esto se deduce que existieron mejoras en la productividad a raíz a la mejora en planificación de las actividades, eliminación de la variabilidad aguas abajo por medio del análisis de restricciones y por el mejor entendimiento del alcance de la planificación semanal que pudo obtenerse gracias a la visualización del modelo.

- La figura 33 muestra los RUP's de MO de la partida de encofrado de las losas macizas de los sótanos.



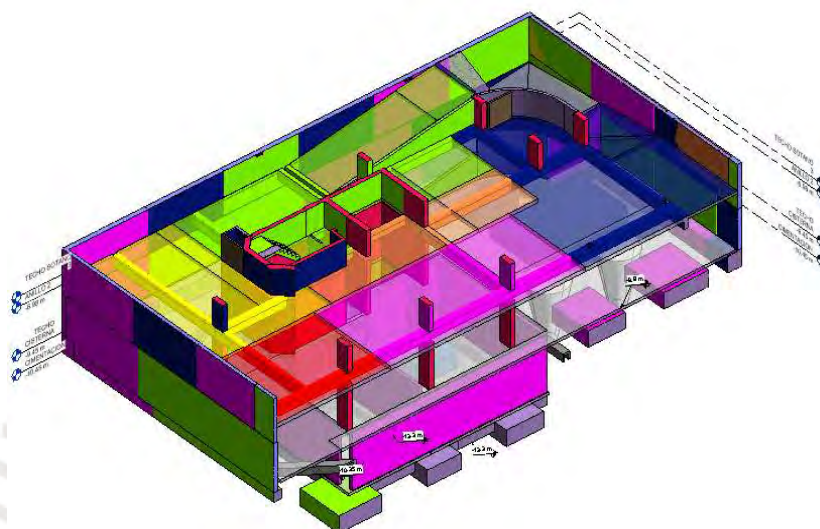


**Figura 33.** Ratio de mano de obra de la partida de carpintería de las losas macizas de los sótanos  
Fuente: Elaboración propia

Esta actividad se inició a partir de la semana 24 con la construcción de la losa maciza del sótano 3. Por un lado, se puede apreciar que el ratio acumulado en azul alcanza valores constantes por debajo del ratio meta igual a  $0.869 \frac{HH}{m^2}$  a partir de la semana 26 hasta la semana 30 aproximadamente. De esto se puede interpretar que el ratio meta extraído de un proyecto similar sirvió para el control de la partida en este proyecto. De la misma forma, el ratio acumulado nos refleja que su naturaleza no fluctuante se debe a una buena sectorización de lotes similares de trabajo que fueron ejecutados con la cantidad de horas hombre necesarias así como también que la información de las actividades se transmitió, comprendió y ejecutó adecuadamente. Cabe resaltar que el abrupto crecimiento del ratio durante la semana 29 se debió a la complejidad de la losa de transferencia del sótano 1, la cual presenta vigas de secciones considerables.

La figura 34 muestra el modelo 3D con la sectorización de las losas del sótano 3; esta

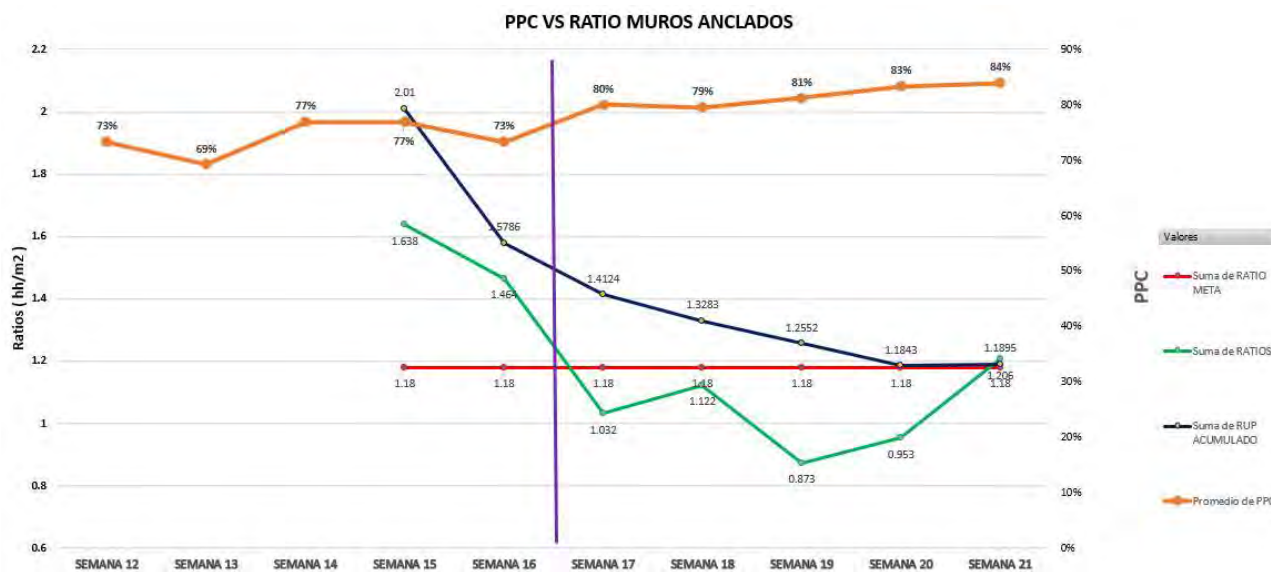
información se transmitió a los encargados de campo para asegurar la comunicación y el involucramiento en las actividades programadas.



**Figura 34.** Modelo 3D de la sectorización de lozas macizas – Sótano 3

### 5.3 Interacción de RUP versus PPC

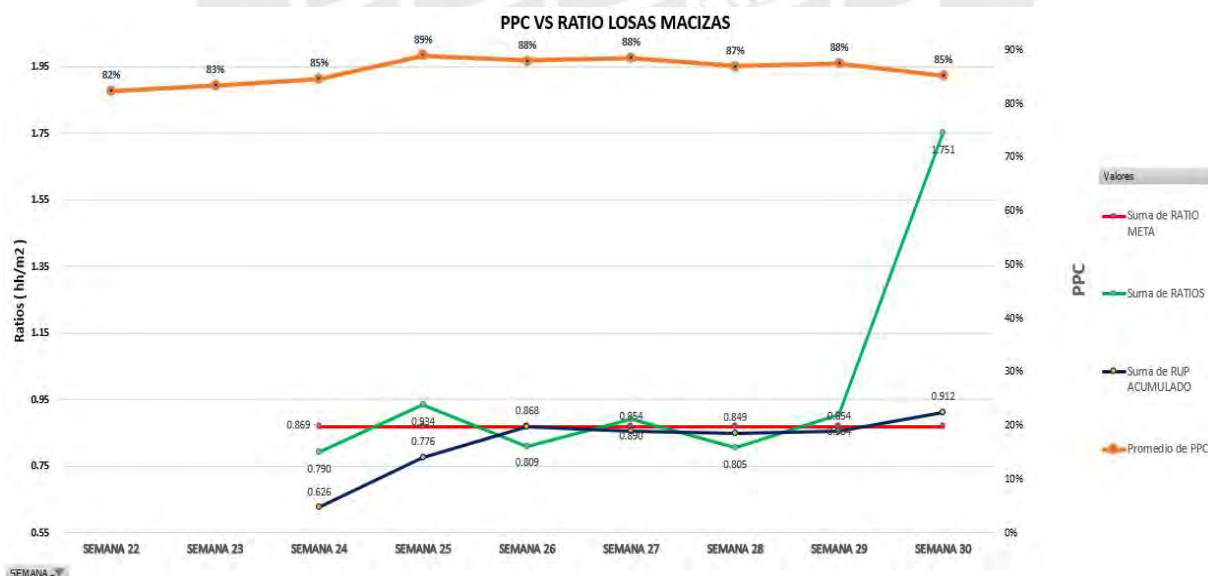
La figura 35 muestra los resultados semanales del PPC y del RUP de la etapa relacionada a la construcción de los muros anclados. Por un lado, a partir de la semana 18 el PPC tiene una tendencia creciente y se encuentra por encima del 80% y durante las siguientes semanas adquiere cierta estabilidad que fluctúa entre 85% y 89%. Por otro lado, se aprecia que el RUP semanal acumulado a partir de la semana 19 empieza a tener una tendencia hacia la baja y a acercarse al RUP meta. De este gráfico, visualmente se aprecia que ambos indicadores poseen una relación inversamente proporcional; es decir, a medida que el PPC se incrementa y se mantiene sin fuertes variaciones, la productividad en obra se incrementa.



**Figura 35.** Gráfico de PPC versus RUP de mano de obra de la partida de encofrado relacionada a los muros anclados

Fuente: Elaboración propia

De manera similar, la figura 36 muestra los indicadores de la ejecución de la losa maciza de los sótanos a partir de la semana 24 hasta la 30.



**Figura 36.** Gráfico de PPC versus RUP de mano de obra de la partida de encofrado relacionada a las losas macizas

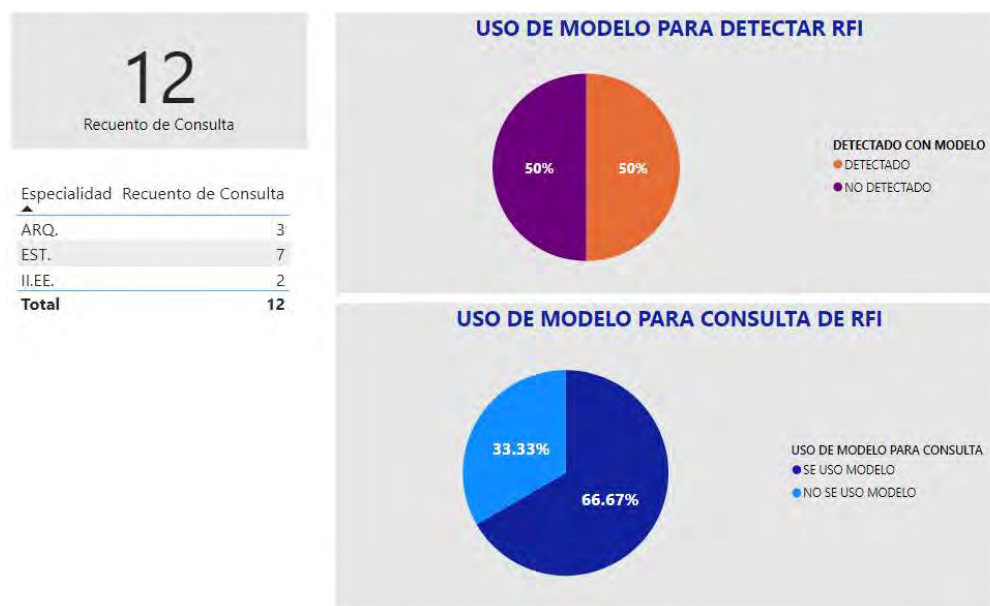
Fuente: Elaboración propia

Se puede apreciar a partir de la semana 25 el RUP semanal acumulado (azul) tiene una tendencia a mantenerse casi constante y muy cerca del RUP meta (rojo) debido a que los RUP diarios no presentan gran variación día a día. En contraste a ello, se aprecia que, durante ese mismo periodo, el desarrollo del PPC tiende nuevamente al alza migrando hacia valores de 88% para posteriormente mantenerse constante. Entonces, nuevamente, se destaca la relación inversamente proporcional entre la subida del PPC y la bajada constante del RUP acumulado. Es más, se puede mencionar que cuando el índice de productividad (RUP) es menos disperso el PPC tiene valores mayores y constantes a diferencia de este presenta picos variables como en el caso de los muros anclados.

#### **5.4 Análisis de la cantidad de las solicitudes de información (RFI)**

Por un lado, al analizar la variable de la participación del modelo en la identificación de los problemas señalados en los RFI's, se encontró que el 50% de estos fueron detectados haciendo uso directo de los modelos y de los recorridos virtuales; por lo que, el otro 50 % hace referencia a los RFI's detectados mediante una inspección simple de los planos CAD.

Por otro lado, al analizar la variable que involucra la participación del modelo en los documentos de RFI con la finalidad de mejorar la comunicación y entendimiento del problema se detectó que en el 67 % de RFI's enviados estaba presente la información procedente del modelo; es decir, se enviaron documentos con isométricos 3D, secciones y cortes extraídos del modelo.



**Figura 37.** Resumen de los resultados del rol del uso del modelo en la detección de RFI's y mejoramiento del entendimiento de estos

### 5.5 Tiempo y precisión para ejecutar metrados.

Según lo señalado en el ítem 4.2.2.5.5, se definió el metrado base a partir del cual se compararían los resultados obtenidos por los participantes y así obtener las variaciones porcentuales referente al área de encofrado, volumen y tiempo ejecutado por sector.

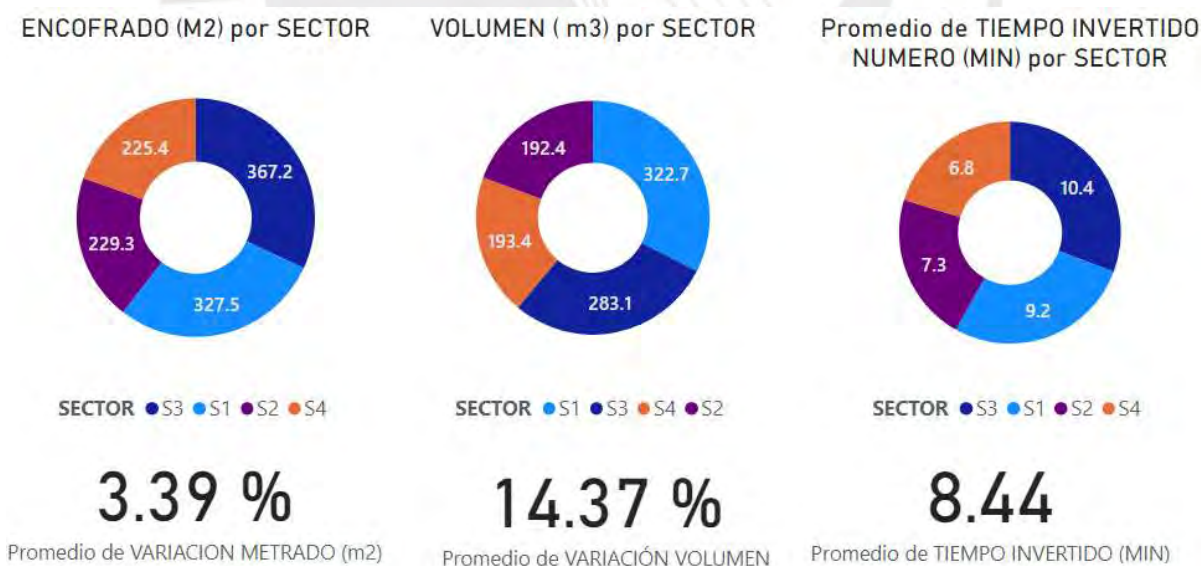
**Tabla 11.** Resumen de los resultados de 2 participantes en el ensayo desarrollado

Participante	Procedencia	Sector	Área de Encofrado (m <sup>2</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )	Hora inicio	Hora fin	Tiempo invertido	Variación del área de encofrado (%)	Variación del volumen (%)	Variación del tiempo (%)
1	VISTA BRASIL	S1	318.792	29.376	15:58	16:08	00:10	1%	9%	500.00%
	VISTA BRASIL	S2	229.32	16.584	16:09	16:14	00:05	5%	9%	500.00%
	VISTA BRASIL	S3	365.472	26.232	16:16	16:24	00:08	2%	10%	800.00%
	VISTA BRASIL	S4	220.968	17.592	16:35	16:40	00:05	3%	25%	500.00%

Participante	Procedencia	Sector	Área de Encofrado (m <sup>2</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )	Hora inicio	Hora fin	Tiempo invertido	Variación del área de encofrado (%)	Variación del volumen (%)	Variación del tiempo (%)
2	LIRI	S1	318.45	29.37	12:22	12:32	00:10	1%	9%	500.00%
	LIRI	S2	225.86	19.77	12:15	12:22	00:07	3%	30%	700.00%
	LIRI	S3	364.06	26.29	12:32	12:45	00:13	2%	11%	1300.00%
	LIRI	S4	221.14	17.6	12:45	12:50	00:05	3%	25%	500.00%

Fuente: Elaboración propia

La tabla 11 muestra el análisis de dos participantes de la misma empresa, pero que trabajan en distintos proyectos. Las tres últimas columnas de la tabla muestran la variación porcentual de los metrados obtenidos con respecto al metrado base realizado usando el complemento de automatización para la cuantificación de encofrado y volumen de elementos. Luego, haciendo uso del software *Power BI* se analizaron los datos extraídos de los 11 participantes que participaron en el ensayo y se extrajo lo siguiente:



**Figura 38.** Resumen gráfico de la variación del metrado y tiempo invertido obtenido por ambos métodos

Fuente: Elaboración propia

En promedio todos los participantes en condiciones de presión realizan un sobre metrado de encofrado que en promedio fue 3.39 %. Se observa un llamativo 14.37 % de metrado adicional en el volumen de los elementos, lo cual conllevaría en la situación hipotética de obra a mayores desperdicios de concreto. Por último, en promedio los participantes demoran 8.44 minutos por sector en realizar los metrados en comparación a los 1.25 minutos que llevan realizar el metrado con una aplicación automatizada. Estas variaciones se deben a que determinar metrados mediante planos en 2D en Autocad es un proceso tedioso, ya que los elementos están representados por líneas y para realizar las cuantificaciones se realizan polilíneas cerradas u otro método similar, los cuales toman más tiempo y pueden llevar a cuantificaciones erradas.

Finalmente, la siguiente tabla resume la variación descrita por sectores planteados en el estudio. Esta información señala que el sector 3 es el que mayores variaciones tuvo, lo cual se debe a que los muros de concreto presentan una arquitectura con mayores detalles que dificultan el proceso de metrado en CAD.

**Tabla 12.** Resumen de los resultados

SECTOR	Promedio de VARIACION METRADO (m2)	Promedio de VARIACIÓN VOLUMEN	Promedio de VARIACION TIEMPO
S1	1.43 %	9.30 %	461.97 %
S2	3.98 %	15.37 %	730.30 %
S3	5.05 %	8.36 %	1037.42 %
S4	3.11 %	24.44 %	682.42 %
<b>Total</b>	<b>3.39 %</b>	<b>14.37 %</b>	<b>728.03 %</b>

Fuente: Elaboración propia

## 5.6 Análisis de la reducción del desperdicio de los vaciados de concreto

Tal como se indicó en el ítem 4.2.2.5.6, el análisis comparativo se llevará a cabo con la información de los vaciados de cada uno de los niveles de las superestructuras de los proyectos Liri (alcance de la presente tesis) y Pinos 3 (construido posteriormente). La separación de ambientes en ambos proyectos había sido proyectada mediante tabiques armados. A solicitud del cliente, el ingeniero residente de Pinos 3 puso en práctica las lecciones aprendidas del proyecto Liri e hizo uso de modelos 3D y 4D. Asimismo, cabe destacar que el desperdicio máximo aceptable será de 5%, debido a que los vaciados en ambos proyectos fueron llevados a cabo mediante un sistema de tuberías metálicas conectadas mediante abrazaderas (cuya ruta se determinaba teniendo en cuenta la máxima distancia requerida para cubrir todos los elementos de los sectores a ser vaciados durante el día) y el uso de una bomba estacionaria TK 70.

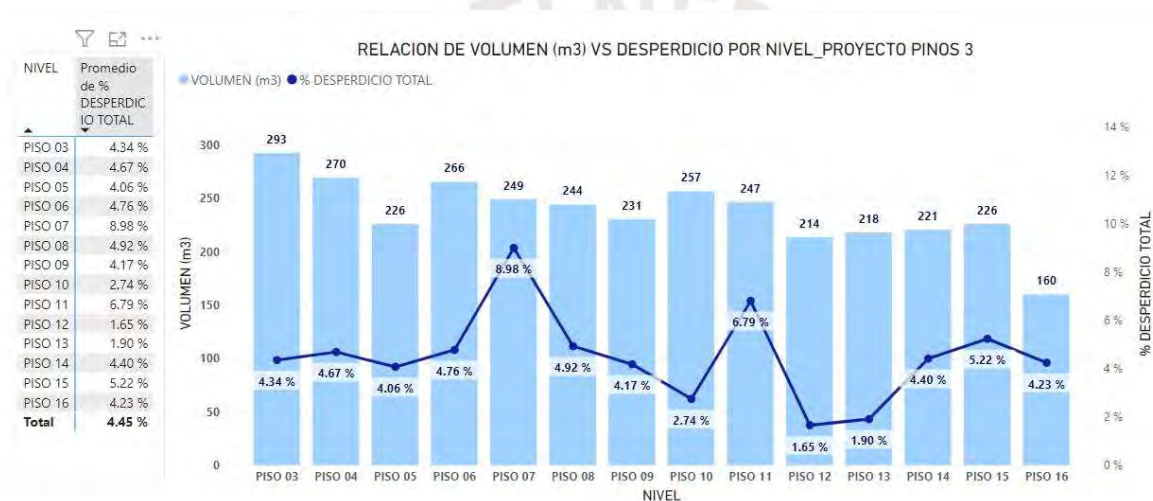


**Figura 39.** Histograma de volumen de concreto por piso y promedio de desperdicio – Proyecto Liri

Fuente: Elaboración propia



La figura 39 muestra el histograma de los volúmenes de los componentes vaciados en cada uno de los 18 pisos de la superestructura del proyecto Liri, los cuales involucran tabiquería de concreto y elementos estructurales (columnas, placas y losas macizas). El desperdicio promedio por piso igual a 4.24% se mantuvo por debajo del 5% en todos los casos excepto en el piso 10 en el cual no se llegó a encofrar un elemento que ya estaba planificado.



**Figura 40.** Histograma de volumen de concreto por piso y promedio de desperdicio – Proyecto Pinos 3

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, el monitoreo de esta métrica para el proyecto Pinos 3 empieza a partir del piso 3, ya que no se cuenta con data previa. Asimismo, se considera relevante señalar que Pinos 3 sí contaba con vigas estructurales mientras que Liri no. La figura 40 indica valores ligeramente mayores de desperdicio de concreto por nivel en comparación con los obtenidos en el proyecto Liri. Este incremento se atribuye a que hubo múltiples veces en las que no se llegaba a encofrar todos los elementos que ya estaban planificados dentro del vaciado del día. Sin embargo, el desperdicio promedio consolidado por piso igual a 4.45%

se mantuvo por debajo del máximo.



PROYECTO MULTIFAMILIAR LIRI		PROYECTO MULTIFAMILIAR PINOS 3	
% DESPERDICIO TOTAL	VOLUMEN TOTAL (M3)	% DESPERDICIO TOTAL	VOLUMEN TOTAL (M3)
4.24 %	2.68 mil	4.43 %	3.66 mil

**Figura 41.** Resumen comparativo de porcentajes de desperdicio de concreto entre ambos proyectos

Fuente: Elaboración propia

En ambos proyectos se logró estar por debajo del porcentaje meta establecido igual a 5%, lo cual tiene un impacto positivo en los recursos financieros del proyecto debido a que la partida de concreto es una de las más influyentes en el presupuesto. Con esto se demuestra que un modelo 3D bien parametrizado juega un rol muy importante en la reducción de los desperdicios de concreto.

## Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones

### 6.1 Conclusiones

- Se elaboraron los modelos 3D de las especialidades de estructuras e instalaciones sanitarias y mecánicas con un LOD 300 para la generación de un modelo federado conforme a la propuesta metodológica. A partir de ello, se implementó el uso de estos modelos 3D durante las reuniones de planificación semanal y diaria, lo cual condujo a una mejora significativa en la representación visual, la gestión del alcance de las actividades programadas y la coordinación entre los últimos planificadores.
- El modelado 4D de la secuencia de actividades correspondientes a la ejecución de los muros anclados y la cisterna del proyecto facilitó el análisis y planificación de la secuencia constructiva óptima a través de iteraciones en basadas en trenes de trabajo y la identificación de restricciones. Asimismo, la implementación del modelo 4D durante las reuniones colaborativas optimizó el tiempo para la toma de decisiones respecto al flujo y secuencia de dichas actividades.
- Se afirma que la aplicación de la metodología propuesta tuvo un impacto positivo en el caso de estudio en cuanto al cumplimiento de los objetivos del cliente, los cuales estaban relacionados principalmente al plazo y costo del proyecto. Esto se vio reflejado de manera indirecta dado que se logró superar el PPC meta establecido igual a 75% con valores superiores al 80% de forma permanente a partir de la tercera semana de la implementación de la metodología (semana 18). Así como también, el  $RUP_{acum}$  de una de

las partidas monitoreadas (encofrado de muros) disminuyó por debajo del ratio meta a partir de la cuarta semana de implementación de la metodología (semana 19) generando un brecha positiva en los costos de mano de obra de la partida. Además, gracias al modelo 3D se logró obtener metrados más precisos y confiables que permitieron minimizar la merma de desperdicios de materiales.

- En cuanto a la medición y análisis de los indicadores cualitativos, se realizaron entrevistas semiestructuradas, formularios Plus/Delta antes y durante la implementación de la propuesta y una encuesta a los stakeholders con la finalidad de validar los resultados obtenidos. Antes de la implementación de la metodología, las entrevistas indicaron que el personal estaba familiarizado con algunas herramientas del LPS, mas no con los pilares del VDC; mientras que el formulario Plus/Delta mostró la necesidad de mejorar la organización y el desarrollo de las reuniones de planificación semanal ya que estas no tenían una agenda establecida y duraban demasiado. Durante la implementación, los formularios Plus/Delta y las encuestas brindaron una retroalimentación positiva, ya que los resultados validaban la sinergia entre las funcionalidades de VDC y los principios LC dentro de los cuales se destacó el aporte de los modelos 3D y 4D a la transparencia y coordinación de las actividades y procesos.
- Con respecto a la medición y análisis de los indicadores cuantitativos, a partir de la tercera semana de la implementación de la propuesta (semana 18) se ha identificado una relación inversamente proporcional entre el  $PPC_{acum}$  y el  $RUP_{acum}$ ; es decir, a medida que el PPC mejora el IP tiende a disminuir hasta inclusive superar el IP meta de la partida. Luego,

Referente a los RFI, se concluye que extraer información como vistas 3D, cortes y secciones procedentes del modelo mejoró la comunicación y el entendimiento de los proyectistas consultados debido a que se redujo el tiempo de latencia de respuesta, cabe resaltar que los proyectistas de las diversas especialidades trabajaron aisladamente durante la etapa de diseño por lo cual no hubo un trabajo compatibilizado ni colaborativo en dicha etapa.

- El uso de complementos de automatización de metrados en modelos 3D con un LOD 300 de dos proyectos con similar proceso constructivo (tabiquería y elementos estructurales de concreto armado) demostró un fortalecimiento en el monitoreo y aseguró un adecuado control de merma dando como resultado un valor por debajo del 5% de desperdicio meta con un valor igual a 4.24% para el proyecto Liri y 4.45% para Pinos 3. Esto permitió generar una brecha positiva en una de las partidas más relevantes del presupuesto de estructuras.
- La gestión visual 3D y automatización del metrado provee al equipo de construcción la capacidad de agilizar la toma de decisiones frente a un replanteo de la planificación diaria, lo cual tiene un impacto significativo en el control del desperdicio del concreto. En consecuencia, se concluye que las herramientas de VDC respaldan la planificación diaria y fomentan el compromiso en los involucrados, lo que se traduce en un adecuado control de desperdicios de materiales.
- Finalmente, por todo lo señalado previamente, se puede afirmar que se satisfizo el objetivo principal de esta investigación la cual fue realizar una propuesta de integración

de las herramientas de la metodología Virtual Design and Construction al Last Planner System (LPS) como soporte al cumplimiento de los principios de la filosofía Lean Construction en un proyecto de edificación multifamiliar.

## 6.2 Recomendaciones

- Se recomienda que las empresas instruyan a sus trabajadores acerca de los conceptos relacionados al *Last Planner System* y a los pilares del VDC mediante capacitaciones para lograr alcanzar mejores resultados en el desarrollo de sus proyectos y fortalecer el compromiso entre los contratistas, subcontratistas y constructores. Asimismo, otro pilar de suma importancia para lograr la evolución de la industria es la investigación, por lo tanto, se recomienda a las empresas formar alianzas con centros de investigación.
- Destacamos las herramientas de LPS; por lo que su implementación o mejora debe partir de los líderes del proyecto. Estas herramientas soportan en conjunto al uso de modelos y reuniones ICE colaborativas para asegurar la planificación de las actividades, identificar las restricciones y mejorar el entendimiento del proyecto y sus actividades.

## Referencias bibliográficas

- Abdullah, S., Abdul-Razak, A., Abubakar, A., & Mohammad, I. S. (2009). Towards producing best practice in the Malaysian construction industry: the barriers in implementing the Lean Construction Approach. *Faculty of Engineering and Geoinformation science, Universiti Teknologi, Malaysia.*
- Abraham, K., Lepech, M., & Haymaker, J. (2013). Selection and Application of Choosing by Advantages on a Corporate Campus Project. En: *Proceedings of the 21st Annual Conference of the International Group for Lean Construction*. IGLC, Fortaleza, Brazil (pp. 349-358).
- Alarcón, L. F., Diethelm, S., Rojo, O., & Calderon, R. (2005). Assessing the impacts of implementing lean construction. Paper presented at the 13th International Group for Lean Construction Conference: Proceedings (pp. 387-393). Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/255606265\\_Assessing\\_the\\_impacts\\_of\\_implementing\\_lean\\_construction\\_Evaluando\\_los\\_impactos\\_de\\_la\\_implementacion\\_de\\_lean\\_construction](https://www.researchgate.net/publication/255606265_Assessing_the_impacts_of_implementing_lean_construction_Evaluando_los_impactos_de_la_implementacion_de_lean_construction)
- Alarcón, L., Mandujano, M., & Mourgues, C. (2013). Analysis of the Implementation of VDC from a Lean Perspective: Literature Review. En *Proceedings of the 21st Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)*, Fortaleza, Brazil, (pp. 781-790). Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/282303357\\_Analysis\\_of\\_the\\_implementation\\_of\\_VDC\\_from\\_a\\_lean\\_perspective\\_Literature\\_review/citations](https://www.researchgate.net/publication/282303357_Analysis_of_the_implementation_of_VDC_from_a_lean_perspective_Literature_review/citations)
- American Institute of Architects. (2013). *G202-2013, Project Building Information Modeling*

*Protocol Form.*

<https://architectis.it/onewebmedia/AIA%20Document%20G202TM%20e2%80%93%202013.pdf>

Arbulu, R. J., & Tommelein, I. D. (2002). Value Stream Analysis of Construction Supply Chains: Case Study on Pipe Supports Used in Power Plants. En *Proceedings of the 10th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)*. Gramado, Brasil, agosto 2002, pp. 183-195. Extraído de <https://iglc.net/Papers/Details/172>

Arroyo, P., Tommelein, I. D., & Ballard, G. (2014). Comparing AHP and CBA as Decision Methods to Resolve the Choosing Problem in Detailed Design. *Journal of Construction Engineering and Management*, 141(1), 04014063. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0000915](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0000915)

Aslam, M., Gao, Z., & Smith, G. (2021). Integrated implementation of virtual design and construction (VDC) and lean project delivery system (LPDS). *Journal of Building Engineering*, 39. doi: 10.1016/j.jobe.2021.102252

Ballard, G., & Tommelein, I. (2016). *Current Process Benchmark for the Last Planner System*. 1–42.

Barco, D. M. (2018). *Guía para implementar y gestionar proyectos BIM* (pp. 2-17). Lima, Perú: Costos SAC.

BIM Forum. (2020). *Level of development (LOD) specification part I & commentary for building information models and data*.

[https://paideia.pucp.edu.pe/cursos/pluginfile.php/2545371/mod\\_resource/content/2/LOD](https://paideia.pucp.edu.pe/cursos/pluginfile.php/2545371/mod_resource/content/2/LOD)



%20Spec%202020%20Part%20I%202020-12-31.pdf

- Bravo, A., Mendoza, J., & Ramirez, H. (2019). Aplicación de Integrated Project Delivery y Virtual Design and Construction para reducir el impacto de las incompatibilidades en la etapa de diseño en edificios residenciales. En *Proceedings of the 17th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: "Industry, Innovation, and Infrastructure for Sustainable Cities and Communities."* DOI: <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2019.1.1.40>
- Cárcel, F., & Roldán, C. (2013). *Los métodos de investigación cualitativa enfocados al mantenimiento industrial.* [https://m.riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/51866/C%C3%A1rcel%20Carrasco%20FJ%20Rold%C3%A1n-Porta%20Carlos\\_Los%20m%C3%A9todos%20de%20investigaci%C3%B3n%20cualitativa....pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://m.riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/51866/C%C3%A1rcel%20Carrasco%20FJ%20Rold%C3%A1n-Porta%20Carlos_Los%20m%C3%A9todos%20de%20investigaci%C3%B3n%20cualitativa....pdf?sequence=3&isAllowed=y)
- Correa, S. (2020). Virtual Design and Construction Application During the Bidding Stage of Infrastructure Projects. En *Proceedings of the 28th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)* (pp. 889–900). International Group for Lean Construction. <https://doi.org/10.24928/2020/0103>
- Daniel, E., Pasquire, C., & Dickens, G. (2015). Exploring the implementation of the Last Planner® System through IGLC community: twenty-one years of experience. En *Proceedings of the 23rd Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)*. Perth, Australia, 29-31 Julio, pp. 153-162. Extraído de <https://iglc.net/Content/Proceedings/IGLC-2015-Proceedings.pdf>
- Del Savio, A. [Capítulo VDC Perú]. (2021). *Metodología VDC*. [Video]. Youtube.

<https://www.youtube.com/watch?v=0GS1vDd0kLo>

- Del Savio, A., Vidal, J., Bazán, A., Rischmoller, L., & Fischer, M. (2022). Virtual Design and Construction (VDC) Framework: A Current Review, Update and Discussion. *Applied Sciences (Basel, Switzerland)*, 12(23), 12178. Doi: <https://doi.org/10.3390/app122312178>
- Elfving, J. A., & Seppänen, O. (2022). Is Construction Industry Still Performing Worse Than Other Industries? En *Proceedings of the 30th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)*. Edmonton, Canadá, 25-31 Julio 2022. pp. 399-409. Doi: <https://doi.org/10.24928/2022/0143>
- Filion, C., Valdivieso, F. & Iordanova, I. (2022). Integrated Scheduling Platform Based on BIM and Lean Construction. En *Proceedings of the 30th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)*. Edmonton, Canadá, 25-31 Julio 2022, pp. 949–960. Doi: <https://doi.org/10.24928/2022/0205>
- Fischer, M., & Kunz, J. (2004). *The scope and role of information technology in construction*. [https://doi.org/10.2208/jscej.2004.763\\_1](https://doi.org/10.2208/jscej.2004.763_1)
- Fischer, M., Reed, D., Khanzode, A., & Ashcraft, H. (2014). A simple framework for integrated project delivery. En *22nd Annual Conference of the International Group for Lean Construction: Understanding and Improving Project Based Production, IGLC 2014* (pp. 1319–1330).
- Fosse, R., & Ballard, G. (2016). Lean design management in practice with the Last Planner System. En *Proceedings of the 24th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)*. Boston, EE. UU, 20-22 Julio, pp. 33-42. Extraído de <https://iglc.net/Content/Proceedings/IGLC-2016-Conference-Proceedings-Volume-1-of->

2.pdf

Fosse, R., Ballard, G. & Fischer, M. (2017). Virtual Design and Construction: Aligning BIM and Lean in Practice. En *Proceedings of the 25th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)*. Heraklion, Greece, 9-12 Julio, pp. 499-506. DOI: <https://doi.org/10.24928/2017/0159>

Franz, B., & Messner, J. (2019). Evaluating the impact of building information modeling on project performance. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 33(3). DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000832

García de Soto, B., Agustí, I., Joss, S., & Hunhevicz, J. (2019). Implications of Construction 4.0 to the workforce and organizational structures. En *International Journal of Construction Management*. DOI: 10.1080/15623599.2019.1616414

Ghio, V. (2001). Productividad en obras de construcción: diagnóstico, crítica y propuesta. Lima: PUCP, Fondo Editorial.

Guerrero, J., Cortez, L, y Carchi, C. (2018). Características comunes a las diversas modalidades de investigación de corte cualitativo y sus diferencias con las de tipo cuantitativo. *Técnicas y métodos cualitativos para la investigación científica*. Machala: Universidad Técnica de Machala, pp. 57-71.

<http://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/12501/1/Tecnicas-y-MetodoscualitativosParaInvestigacionCientifica.pdf>

Jackson, M., & Hertzman, J. (2020). Las ferias comerciales en tiempos de Coronavirus.

Lagos, C. I. , Herrera, R. F. , Muñoz, J., & Alarcón, L. F. (2022). Influence of Last Planner System Adoption Level on Project Management and Communication. En *Proceedings of the 30th*

- Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)*. Edmonton, Canadá, 25-31 Julio 2022, pp. 211-222. Doi: [doi.org/10.24928/2022/0124](https://doi.org/10.24928/2022/0124)
- Lean Construction Institute. (s/f). *Work structuring*.  
[https://leanconstruction.org/media/learning\\_laboratory/new/TDC-CH39-Work%20Structuring.pdf](https://leanconstruction.org/media/learning_laboratory/new/TDC-CH39-Work%20Structuring.pdf)
- Khazode, A., Fischer, M., Reed, D., & Ballard, G. (2006). *A Guide to Applying the Principles of Virtual Design & Construction (VDC) to the Lean Project Delivery Process*. CIFE Working Paper#093.
- Kim, Y. W., & Ballard, G. (2010). Management Thinking in the Earned Value Method System and the Last Planner System. En *Journal of Management in Engineering*, 26(4), pp. 223–228.
- Koskela, L., (1992). *Application of the new production philosophy to construction*. Stanford university (Technical Report No. 72, Center for Integrated Facility Engineering, Department of Civil Engineering). Stanford, CA.
- Koskela, L. (2000). *An exploration towards a production theory and its application to construction*. Finlandia: VTT Technical Research Center of Finland.
- Koskela, L., Ballard, G., & Bolviken, T. (2023). Waste: Why economics got it so wrong, and what could be the remedy? En: *Proceedings of the 31<sup>st</sup> Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC31)*. Lille, Francia, 26 de Junio – 02 de Julio 2023, pp. 1-12. Doi: <https://doi.org/10.24928/2023/0300>
- Kunz, J., & Fischer, M. (2012). Virtual Design and Construction: Themes, case studies and implementation suggestions. *Center for Integrated Facility Engineering, Stanford*

*University.*

- Ma, Z., Zhang, D., & Li, J. (2018). A dedicated collaboration platform for Integrated Project Delivery. En *Automation in Construction*, 86, (pp. 199–209). doi: 10.1016/j.autcon.2017.10.024
- Mahalingam, A., Yadav, A. K., & Varaprasad, J. (2015). Investigating the role of lean practices in enabling BIM adoption: Evidence from two indian cases. *Journal of Construction Engineering and Management*, 141(7) doi:10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000982
- Majumdar, T., Rasmussen, S.G., Del Savio, A.A., Johannesdóttir, K., Hjelseth, E., & Fischer, M.A. (2022). VDC in Practice: A Preliminary Categorization of Production Metrics reported in Scandinavia and Latin America. En *Proceedings of the 30<sup>th</sup> Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC30)*. Edmonton, Canadá, 25-31 Julio, pp. 1177–1185. Doi: [doi.org/10.24928/2022/0230](https://doi.org/10.24928/2022/0230)
- Mandujano, M., Alarcón, L., Kunz, J., & Mourgues, C. (2015). Use of virtual design and construction, and its inefficiencies, from a lean thinking perspective. En: *Proceedings of IGLC 23 - 23rd Annual Conference of the International Group for Lean Construction: Global Knowledge - Global Solutions* (pp. 836-845).
- Mandujano, M., Alarcón, L., Dave, B., Mourgues, C., & Koskela, L. (2021). Understanding the interaction between Virtual Design, Construction and Lean Construction. En *Proceedings of the 29th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)*. Lima, Peru, 14-16 Julio 2021. pp 107-115. Doi: <https://doi.org/10.24928/2021/0124>
- Maraqá, M., Sacks, R., & Spatari, S. (2020). Empirical assessment of the impact of VDC and lean on environment and waste in masonry operations. En *Proceedings of the 28th Annual*

- Conference of the International Group for Lean Construction 2020* (pp. 985-996).  
doi:10.24928/2020/0040
- Maraqa, M. J., Sacks, R., & Spatari, S. (2022). Role of Lean and VDC in Reducing Physical and Operational Waste and Environmental Impact. En *Proceedings of the 30<sup>th</sup> Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC30)*. Edmonton, Canadá, 25-31 Julio, pp. 36–47. Doi: [doi.org/10.24928/2022/0104](https://doi.org/10.24928/2022/0104)
- Miller, D. (2005). Two Quick Ways To Improve Teaching: Learning Objectives And Plus/Delta Forms. En *2005 Annual Conference and Exposition: The Changing Landscape of Engineering and Technology Education in a Global World*. Doi: 10.18260/1-2--14616
- Mossman, A. (2012). Choosing by advantages. *Military Engineer*, 102(667), (pp. 73–74). doi: <https://doi.org/10.13140/2.1.1402.5609>
- Mossman, A. (19 de diciembre de 2019). Uso de Plus/Delta para la retroalimentación y la mejora de los procesos sociales. *Lean Construction México*.  
<https://www.leanconstructionmexico.com.mx/post/uso-de-plus-delta-para-la-retroalimentaci%C3%B3n-y-la-mejora-de-los-procesos-sociales>
- Peralta J., Martínez B. & Enríquez J. (2020). Industria 4.0. *Inventio*, 16(39), 0-7.  
<https://doi.org/10.30973/inventio/2020.16.39/4>
- Peláez, A., Rodríguez, J., Ramírez, S., Pérez, L., Vázquez, A., & González, L. (2013). La entrevista. Universidad autónoma de México.  
<https://docplayer.es/393295-Entrevista-alicia-pelaez-jorge-rodriguez-samantha-ramirez-laura-perez-ana-vazquez-laura-gonzalez.html>
- Pons, J. F. (2014). La necesidad de un cambio de modelo productivo. En *Introducción a Lean*

- Construction* (pp. 11-14). Madrid, España: Fundación Laboral de la Construcción.
- Pons, J., & Rubio, I. (2019). *Lean Construction y la planificación colaborativa: Metodología del Last Planner System*. Madrid, España: Consejo General de la Arquitectura Técnica
- Porras, H., Sánchez, O., & Galvis, J. (2014). Filosofía Lean Construction para la gestión de proyectos de construcción: una revisión actual. *Avances: Investigación en Ingeniería*, 11(1), 32–53. <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.298>
- Ramírez, J. (2016). *Estudio de factores de productividad enfocado en la mejora de la productividad en obras de edificación*. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Retamal, F. Salazar, L.A., & Alarcón, L.F. (2022). Online Monitoring and Implementation of Commitment Management Performance and its Impact on Project Planning in four construction projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 148(10). Doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.000237](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.000237)
- Riddell, T. (30 de noviembre de 2018). What is an RFI in Construction? Best Practices for the Subcontractor. *Esub: Construction software*. <https://esub.com/construction-project-management-software-blog/the-rfi-and-its-implication-for-the-subcontractor/>
- Rischmoller, L., Reed, D., Khanzode, A., & Fischer, M. (2018). Integration enabled by Virtual Design and Construction as a Lean implementation strategy. En *Proceedings of the 26th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)*. Chennai, India, 16-22 Julio, pp. 240-249). Doi: <https://doi.org/10.24928/2018/0521>
- Rodríguez, A. [Capítulo VDC Perú]. (2021). *Metodología VDC*. [Video]. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=0GS1vDd0kLo>

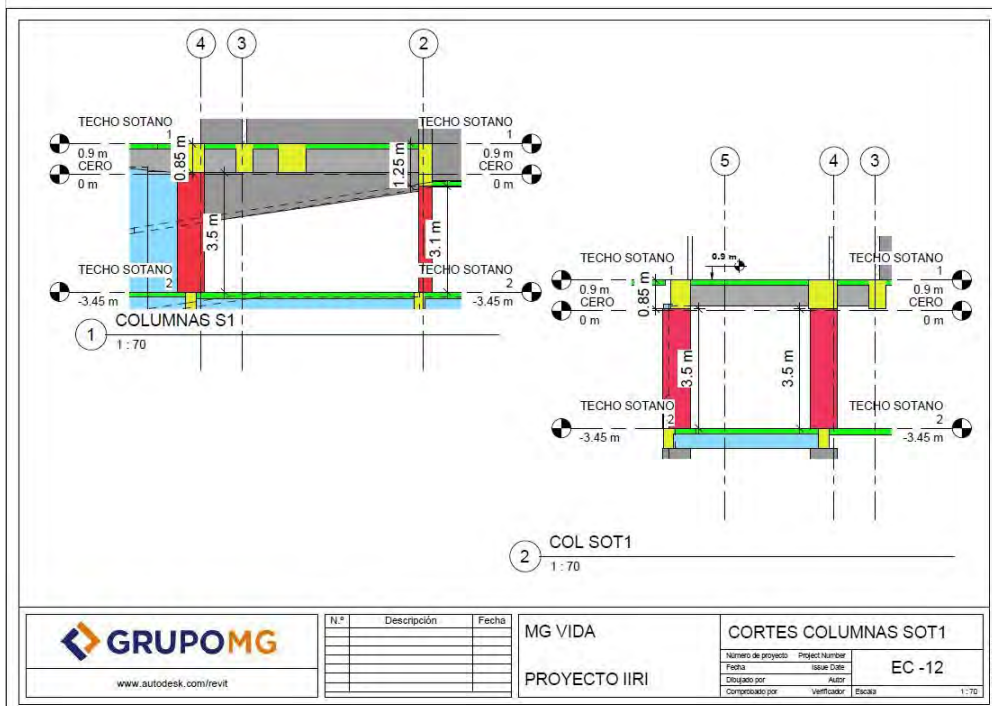
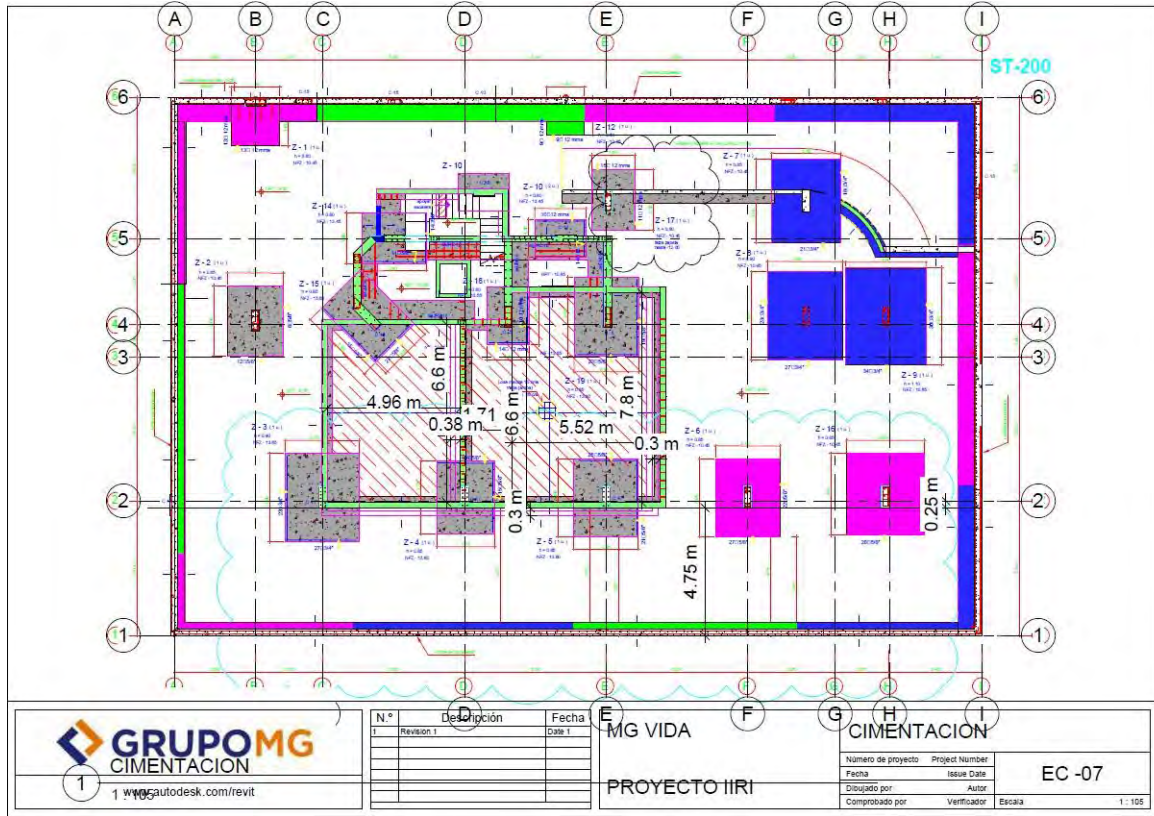
- Sacks, R., Koskela, L., Dave, B. A., & Owen, R. (2010). Interaction of Lean and Building Information Modeling in construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(9), pp. 968-980. Doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000203](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000203)
- Salazar, L., Trefogli, M. y Del Savio, A. A. (2023). A VDC framework proposal for time optimization in diamond drilling operations for mining. En *Proceedings of the 31<sup>st</sup> Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC31)*. Lille, Francia, 26 de Junio – 02 de Julio 2023, pp. 1582 – 1592. Doi: <https://doi.org/10.24928/2023/0233>
- Salem, O., Solomon, J., Genaidy, A., & Minkarah, I. (2006). Lean construction: From theory to implementation. En *Journal of Management in Engineering*, 22(4), (pp. 168-175). DOI:10.1061/(ASCE)0742-597X(2006)22:4(168)
- Sastri, A., & Rao, K. (2013). Plus/Delta (+/Δ) evaluation to help organizations deliver projects effectively. En *Lecture Notes in Electrical Engineering* (pp. 563–569). Springer New York.
- Souza, U. (2000). Como medir a produtividade do trabalho na construção. En Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 8(1).
- Tuesta, R., Vicuña, M., Del Savio, A., Palpan, A., Valle, E., Quiroz, F. (2022). Prefabricated Reinforcement in Construction Using VDC: Case Study Ovalo Monitor Bridge. En *Proceedings of the 30th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)*. Edmonton, Canadá, 25-31 Julio, pp. 1008-1019. Doi: <https://doi.org/10.24928/2022/0210>

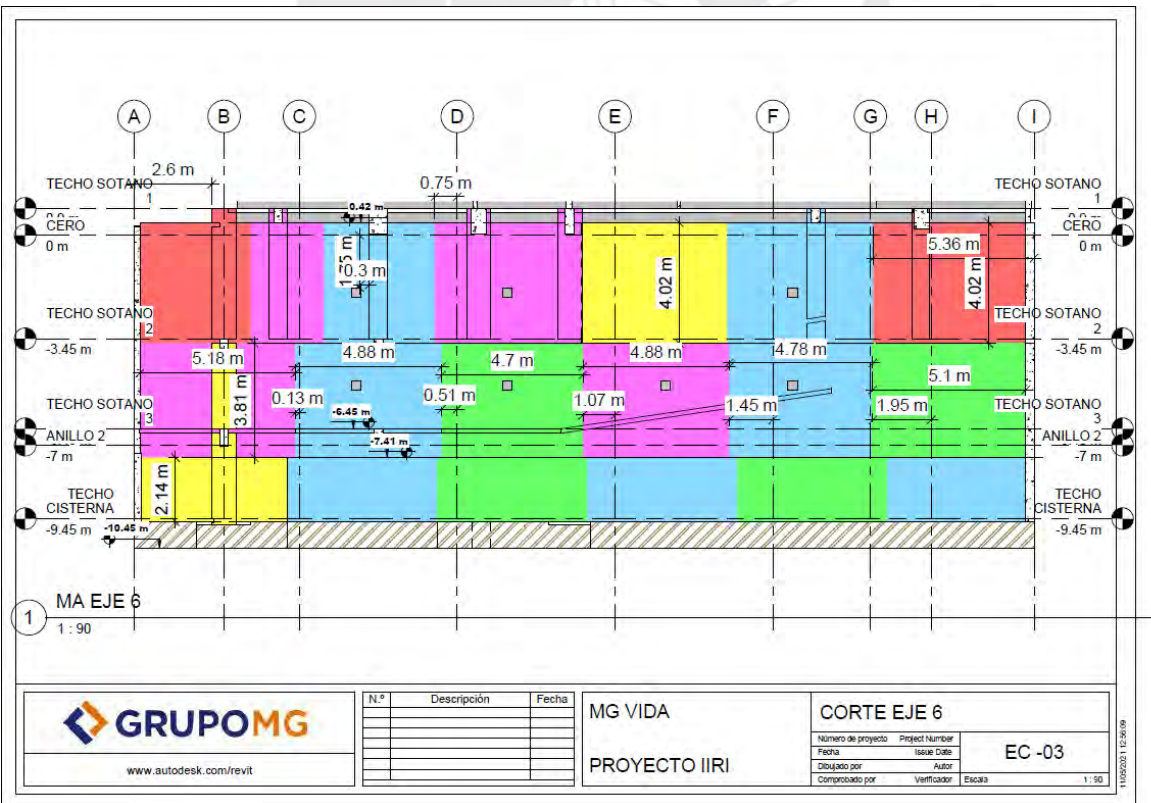
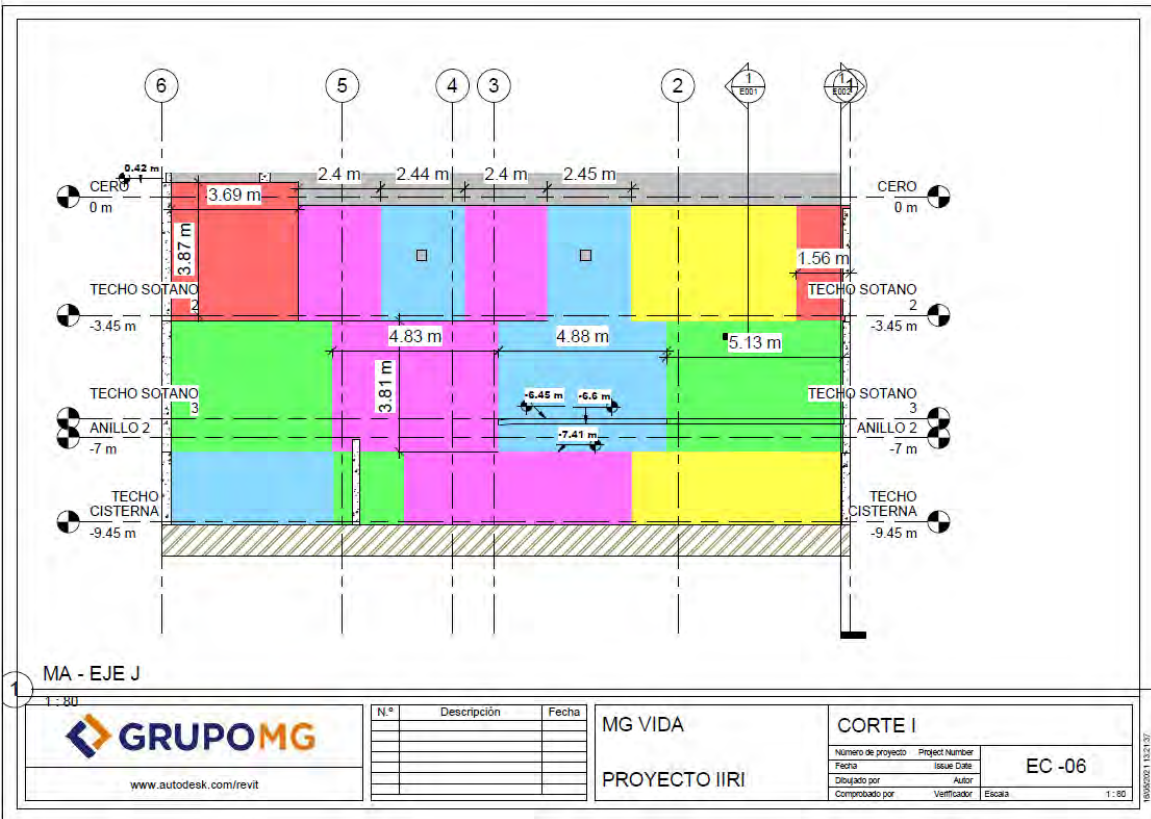


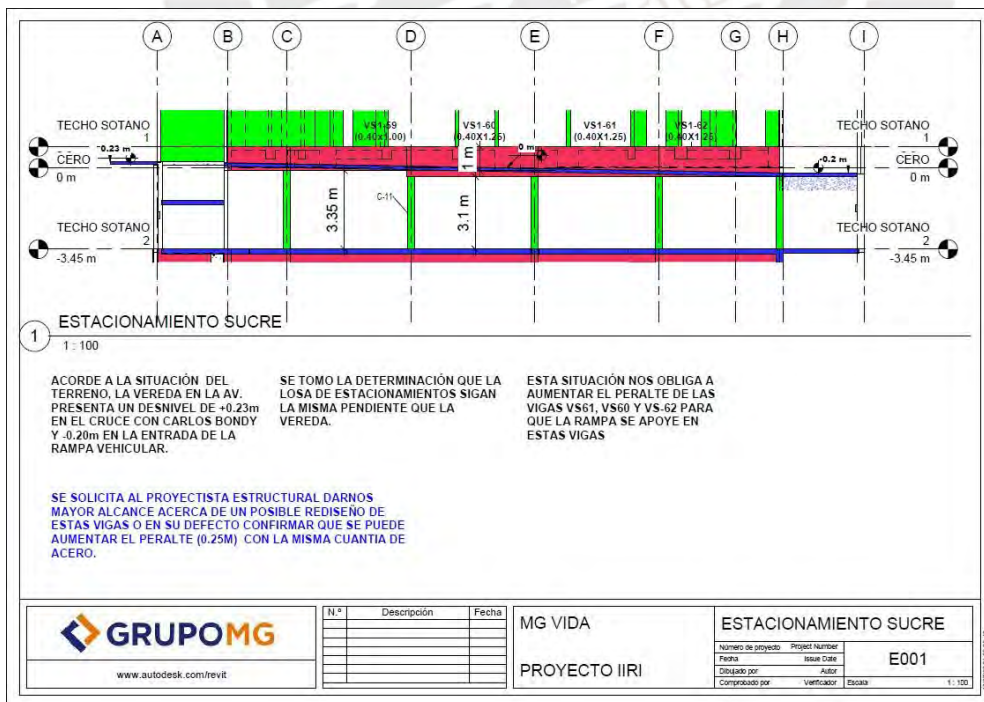
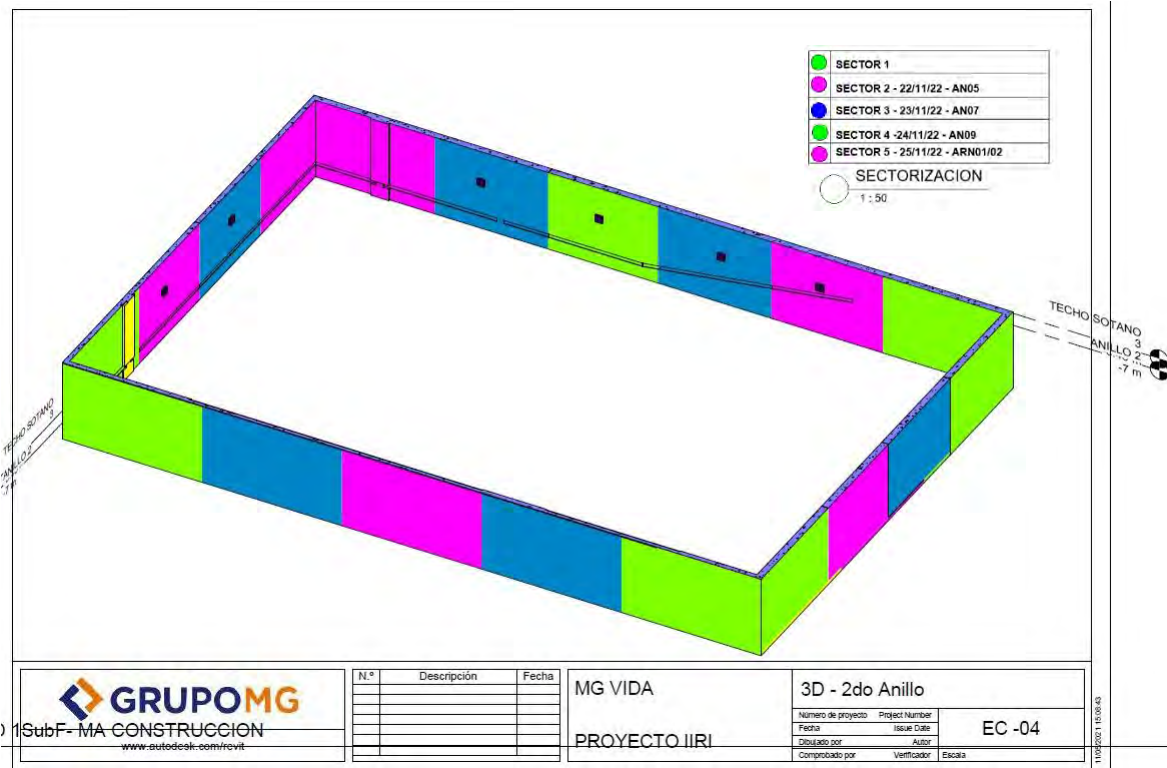
Vargas, J., & Muratalla, G., & Jiménez, M. (2016). Lean Manufacturing ¿una herramienta de mejora de un sistema de producción? Ingeniería Industrial. En *Actualidad y Nuevas Tendencias*, V(17),153-174 <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=215049679011>

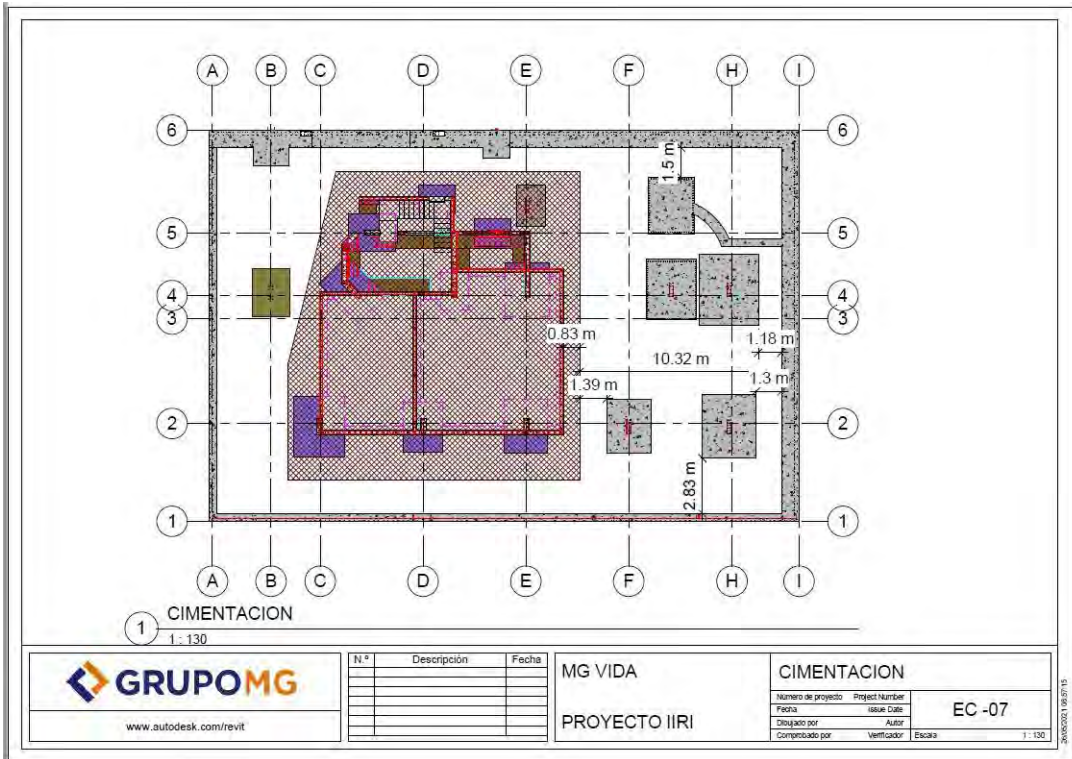


# ANEXOS

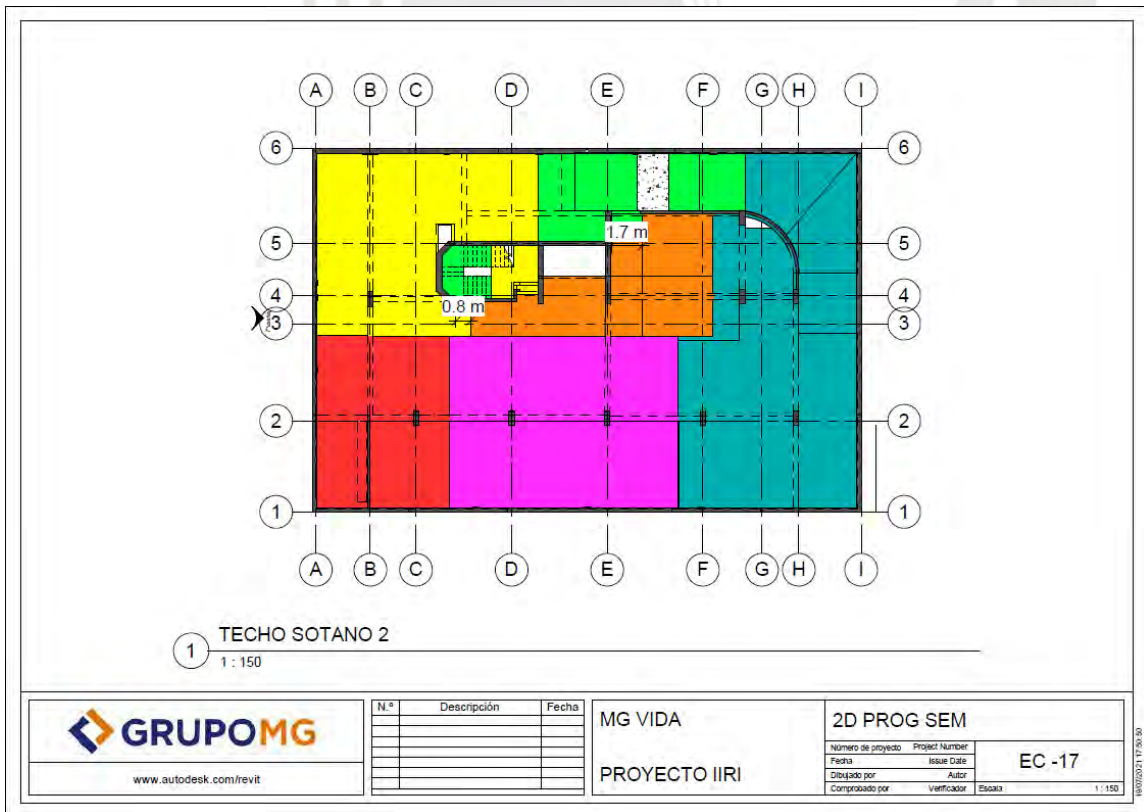




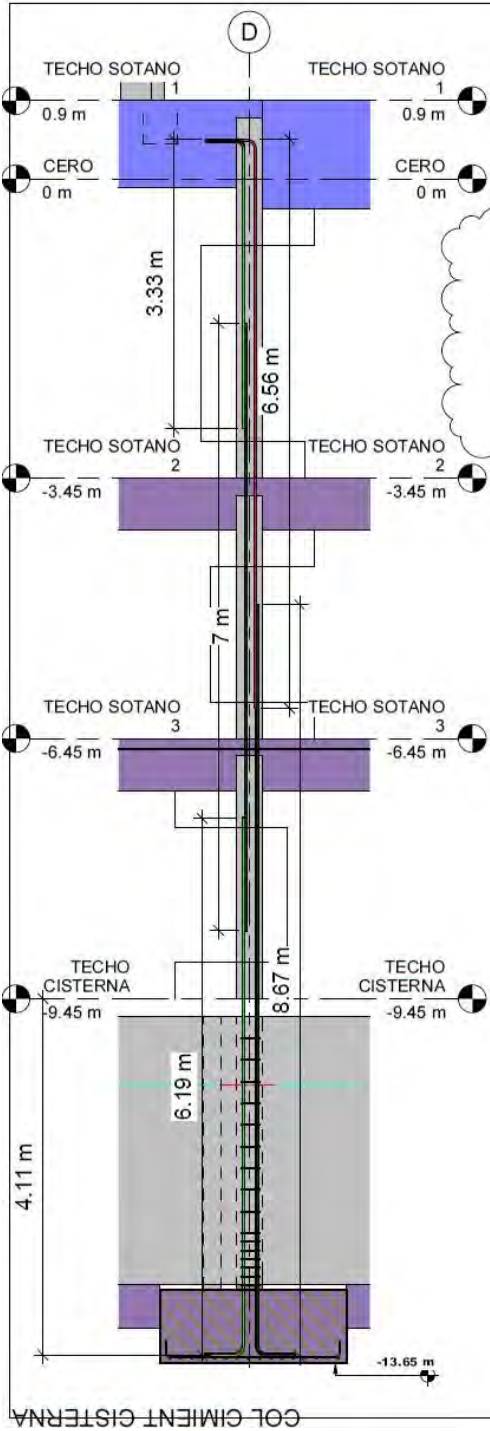




20/03/2021 09:57:15



16/03/2021 17:55:39



CORTE 1 6.65m 5.35m  
 CORTE 1 7.00m 5.00m  
 CORTE 1 3.70m 5.00m  
 Entera 9.00m  
 CORTE 1 7.00m 5.00m

CISTERNA COLUMNA	
Numero de proyecto	EC -10
Fecha	
Elaborado por	Autor
Comprobado por	Verificador
	Escala
	1 : 40

MG VIDA  
 PROYECTO IIRI

N.º	Descripción	Fecha
1	Revision 1	Date 1



www.autodesk.com/revit

## Encuesta de percepción dirigida hacia los últimos planificadores

**Objetivo:** Recoger las impresiones de los participantes para validar los aportes de la adopción de herramientas VDC (tales como representación virtual del edificio, reuniones de alta colaboración en las que se hace uso de la tecnología, y el diseño y planificación de procesos) al Sistema del último planificador para mejorar la performance de la obra.

¿Qué tan útil fue usar modelos virtuales del proyecto durante las reuniones colaborativas para

1. mejorar la visualización del producto final? Indique su valoración siendo: 1 Nada útil, 2 Poco útil, 3 Neutro, 4 Útil y 5 Muy útil.

1                      2                      3                      4                      5

2. mejorar el entendimiento de las actividades y procesos que se deben realizar para cumplir con la planificación semanal?

1                      2                      3                      4                      5

3. mejorar la transparencia de las actividades y procesos relacionados a la ejecución de la obra?

1                      2                      3                      4                      5

4. reducir la variabilidad de las actividades y procesos durante la ejecución de la obra?

1                      2                      3                      4                      5

5. reducir el tiempo del ciclo requerido para la extracción de información tales como metrados, elevaciones de algún sector del plano, entre otros?

1                      2                      3                      4                      5

6. Según su percepción, ¿qué otros beneficios han sido producto de la adopción de las herramientas señaladas en el primer párrafo de esta encuesta?

---


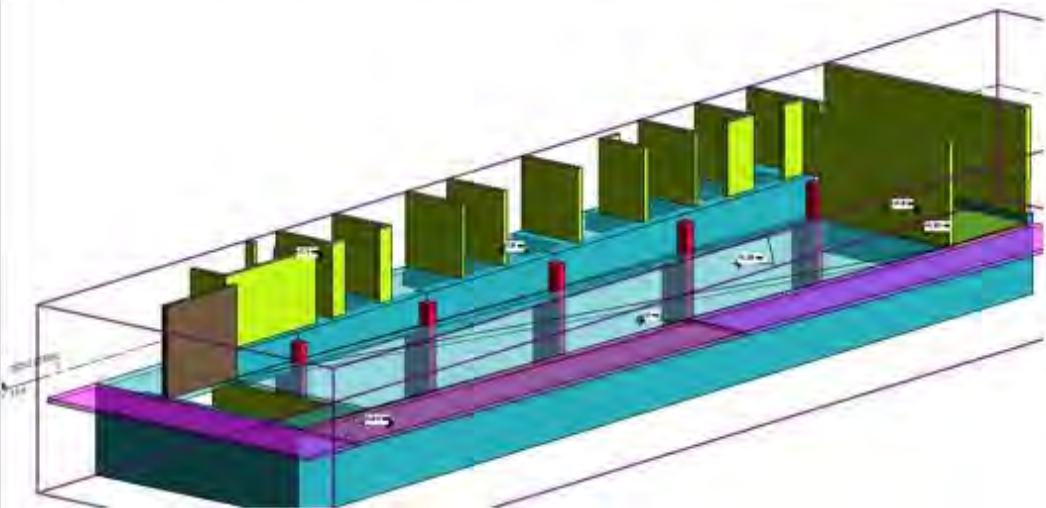
---

---

---

---



		SOLICITUD DE INFORMACIÓN (RFI)		Código RFI-01-004			
AREA DE INGENIERIA				Fecha			
Nº Solicitud de Información: 001		Revisión:01		Fecha respuesta requerida:			
Solicitante:		Disciplina: Estructuras					
Proyecto:		Cliente:					
Documentos de referencia: E-04							
<b>1.- Información técnica solicitada:</b> A raíz de la fuerte pendiente de la vereda se tomó la decisión de que la losa de estacionamientos ubicada entre los ejes B-H/1-2 siga la misma pendiente; motivo por el cual la losa pierde su apoyo en viga antes del eje D. Se plantea como opción incrementar el peralte de viga. Sin embargo, se deja a criterio del especialista estructural plantear una nueva solución para el apoyo de la rampa con pendiente.							
							
CARGO		NOMBRE		FIRMA		FECHA	
		Gonzalo Loayza Torres					
<b>2.- Respuesta a RFI:</b>							
CARGO		NOMBRE		FIRMA		FECHA	