

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ**

**“MEJORANDO LA VISUALIZACIÓN Y LA COMUNICACIÓN EN EL
LAST PLANNER SYSTEM A TRAVÉS DEL USO DE MODELOS
BIM”**

Tesis para optar el Título de **Ingeniero Civil**, que presenta el bachiller:

Rusbert Gonzalo Huatuco Rodríguez

ASESOR: Mag. Danny Eduardo Murguía Sánchez

Lima, julio del 2017

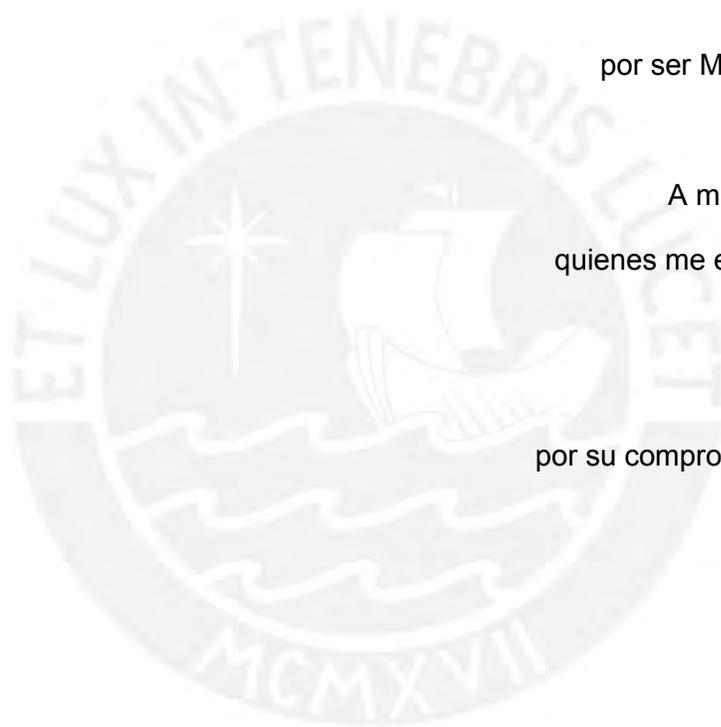
DEDICATORIA

A Dios,
por ser mi Señor y dador de vida.

A la Santísima Virgen,
por ser Madre de apoyo y fortaleza.

A mis padres y mis hermanos,
quienes me enseñaron a amar y servir.

A mi asesor,
por su compromiso, paciencia y entrega.



RESUMEN EJECUTIVO

El presente trabajo se desarrolla en el área de Gestión de la Construcción, de manera específica, en el área de *Building Information Modeling* y *Lean Construction*. Por ello, se elabora un modelo de integración entre el modelo virtual BIM y el *Last Planner System* y se especifica el nivel de desarrollo de cada elemento virtual para cada etapa del LPS.

Luego, se analiza un caso de estudio que se desarrolla en dos escenarios. En el primer escenario se planifica solo con el LPS. En el segundo escenario, se implementa el modelo virtual al LPS, y al término del caso de estudio se encuesta a los participantes de las reuniones de planificación.

Finalmente, se procesa los datos obtenidos en ambos escenarios, se analiza los resultados y se elabora conclusiones y recomendaciones.

La memoria descriptiva se divide en los capítulos siguientes:

- Capítulo 1: Generalidades
- Capítulo 2: Método de la investigación
- Capítulo 3: Revisión de la literatura
- Capítulo 4: Desarrollo del modelo de integración
- Capítulo 5: Caso de Estudio
- Capítulo 6: Análisis de resultados
- Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Título : Mejorando la visualización y la comunicación en el *Last Planner System* a través del uso de modelos BIM
Área : Construcción y Gestión
Asesor : Danny Eduardo Murguía Sánchez
Alumno : RUSBERT GONZALO HUATUCO RODRIGUEZ
Código : 2011.2547.412
Tema N° : # 285
Fecha : Lima, 17 de abril de 2017



PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA:

En los proyectos de construcción, existe una marcada diferencia entre el trabajo planificado en gabinete y el trabajo ejecutado en campo (Ballard 1999). La diferencia se puede atribuir a una alta variabilidad de los recursos requeridos, así como a la falta de herramientas de visualización para anticipar las tareas futuras, y de comunicación para informar adecuadamente los planes de construcción a los equipos de trabajo. Como resultado, existen retrasos en los plazos de construcción y sobrecostos. Asimismo, factores contextuales como el tamaño de la empresa constructora, los sistemas de gestión utilizados por la misma, y el grado de subcontratación pueden influir directamente en la confiabilidad de la planificación (Guio 2001).

Muchas empresas constructoras peruanas implementan "*Last Planner System*" (LPS) para la planificación de proyectos. El uso de modelos BIM promete una mejora en la comunicación con los subcontratistas y la visualización anticipada del proceso constructivo. La confiabilidad de la planificación puede mejorar con la ayuda de un modelo virtual que incluya elementos auxiliares de construcción para mejorar la gestión visual a nivel de operaciones (O'Connor et al. 2013). Asimismo, visualizar dos programaciones 4D al día (mañana y tarde), permite la mejora de la visualización del proceso constructivo pues usualmente se programan más de una actividad al día en una localización (Murguía & Brioso 2017). La visualización de los elementos auxiliares y dos modelos 4D diarios permitirían mejorar la comunicación con los subcontratistas y la distribución logística interna de la obra en comparación a la planificación basada en planos 2D y tablas de Excel.

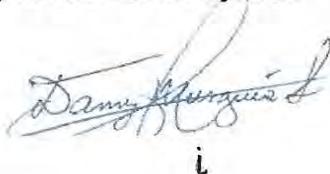
Por ello, se hace necesario explorar en campo la implementación de modelos virtuales BIM para potenciar el efecto del LPS (Orihuela 2015) para visualizar claramente el alcance semanal, facilitar la comunicación entre los involucrados, y mejorar la confiabilidad de la programación.

OBJETIVO PRINCIPAL:

En base a la literatura, desarrollar un modelo de sinergia de *Last Planner System* y BIM e implementar dicho modelo al nivel de programación semanal a través de la participación directa del tesista en campo.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Revisar la literatura existente acerca de la sinergia Lean - BIM y de la interacción entre un modelo BIM 3D&4D y el *Last Planner System*.



- Desarrollar un modelo de integración entre *Last Planner System* y un modelo BIM para la especialidad de Estructuras, con especificación de niveles de desarrollo BIM para cada etapa del *Last Planner*.
- Implementar los modelos virtuales en un proyecto de edificación en las reuniones de planificación semanal y compararla con una etapa previa sin modelos virtuales. Complementar las observaciones de campo con encuestas a los participantes de las reuniones semanales.
- Elaborar conclusiones y recomendaciones de la implementación del modelo virtual BIM 3D&4D al *Last Planner System* en un proyecto de edificación.

PLAN DE TRABAJO:

1. Revisión de la literatura. - Se recopilará la información referida al sistema *Building Information Modeling*, *Lean Construction* y *Visual Management*. Además, se revisará la integración de la herramienta de modelos BIM y el *Last Planner System*.
2. Desarrollo del modelo de integración. - Se elaborará un modelo de integración entre la herramienta *Last Planner System* y el modelo BIM para la especialidad de Estructuras en base a modelos previos. El modelo de integración incluirá además, el nivel de desarrollo de cada elemento virtual para cada etapa del *Last Planner*.
3. Implementación del modelo virtual a un caso de estudio. - En un primer escenario, se recolectará información de la reunión de planificación sin modelos. En un segundo escenario, se implementará el modelo virtual a la reunión de planificación. Finalmente, se entrevistará a los participantes de las reuniones semanales.
4. Análisis de resultados. - Se comparará la performance de la reunión de planificación de ambos escenarios y se analizará el impacto que generó el modelo virtual en los últimos planificadores.
5. Conclusiones y recomendaciones. - Se analizará los beneficios y las limitaciones de la herramienta utilizada. Además, se elaborará recomendaciones para futuros proyectos de investigación.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA:

- Ballard, G. (1999) "Improving Work Flow Reliability," in *Proc. 7th Ann. Conf. Int'l. Group for Lean Construction*, Berkeley, USA.
- Ghio, Virgilio. (2001) "Productividad en Obras de Construcción: Diagnóstico, Crítica y Propuesta" Lima: Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú.
- O'Connor, R. & Swain, B. (2013) "Implementing Lean in construction: Lean tools and techniques - an introduction," in *CIRIA Guide to Implementing Lean in Construction C730*.
- Orihuela, P; Canchaya, L & Rodríguez, E. (2015) "Gestión Visual del Sistema Last Planner Mediante el Modelado BIM," in *SIBRAGEC - ELAGEC*.
- Murguía, D. & Brioso, X. (2017) "Using Choosing by Advantages and 4D Models to Select the Best Construction-Flow Option in a Residential Building," in *Procedia Engineering*.

Maximo : 100 paginas



ÍNDICE

LISTA DE TABLAS.....	vii
LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS.....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
CAPÍTULO 1: GENERALIDADES.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Antecedentes.....	3
1.3 Justificación.....	3
1.4 Pregunta de investigación.....	4
1.5 Objetivo.....	4
1.6 Alcance.....	5
1.7 Delimitación de la investigación.....	5
CAPÍTULO 2: MÉTODO DE INVESTIGACIÓN.....	6
2.1 Revisión de literatura.....	6
2.2 Desarrollo del modelo de integración.....	6
2.2.1 Integración del modelo virtual 3D&4D BIM al LPS.....	6
2.2.2 Criterios de modelado 3D.....	6
2.2.3 Criterios de modelado 4D.....	6
2.3 Caso de Estudio.....	6
2.3.1 Planificación semanal.....	6
2.3.2 Medición de indicadores cuantitativos y cualitativos.....	7
2.3.2.1 Porcentaje de plan completado.....	7
2.3.2.2 Causas de no cumplimiento.....	7
2.3.2.3 <i>Task Made Ready</i>	7
2.3.2.4 <i>Task Anticipated</i>	7
2.3.2.5 Entrevista Semiestructurada.....	7

2.4	Análisis de resultados.....	7
2.5	Conclusiones y recomendaciones	7
CAPÍTULO 3: REVISIÓN DE LA LITERATURA.....		8
3.1	<i>Building Information Modeling</i>	8
3.1.1	Definición de BIM	8
3.1.2	Aplicaciones	10
3.1.3	Beneficios.....	13
3.1.3.1	Metrado	13
3.1.3.2	Visualización	14
3.1.3.3	Resolución de Incompatibilidades.....	15
3.1.3.4	Aporte de constructabilidad.....	16
3.1.3.5	Reducción de <i>Request For Information</i>	16
3.1.3.6	Secuencia de construcción	17
3.1.3.7	Resolución de conflictos de espacio	17
3.1.4	<i>Level of Development</i>	18
3.2	<i>Lean Construction</i>	19
3.2.1	<i>Last Planner System</i>	21
3.2.2	<i>Choosing By Advantages</i>	28
3.3	Sinergia LEAN - BIM.....	30
3.3.1	Integración del modelo virtual BIM con el <i>Last Planner System</i>	32
3.3.2	Casos de estudio que integra la sinergia LEAN – BIM.....	34
3.4	<i>Visual Management</i>	36
3.4.1	<i>Virtual Huddle</i>	38
CAPÍTULO 4: DESARROLLO DEL MARCO CONCEPTUAL.....		39
4.1	Modelo de integración <i>Last Planner System</i> y BIM.....	39
4.1.1	<i>Master Schedule</i> – Alternativas de Modelo 4D en base a 3D Genérico ..	40
4.1.2	<i>Phase Scheduling</i> – Alternativas de Modelo Pull 4D para cada Fase	43

4.1.3	<i>Lookahead Planning</i> – Modelo 4D para un tiempo horizonte a nivel de operaciones.....	45
4.1.4	<i>Commitment Planning</i> - Modelo 4D para la reunión de programación	48
4.1.5	<i>Virtual Huddle</i> – Modelo 4D para las cuadrillas de trabajo.....	49
4.1.6	Ejecución - Registro Semanal y Seguimiento con el Modelo 4D.....	50
4.2	Criterios de Modelado 3D	52
4.3	Criterios de Modelado 4D	57
CAPÍTULO 5: CASO DE ESTUDIO		61
5.1	Descripción del proyecto	61
5.2	Organigrama del proyecto	62
5.3	Recurso tecnológico	63
5.4	Recolección de datos	63
5.4.1	Escenario 1	63
5.4.1.1	Planificación semanal	64
5.4.1.2	Medición de indicadores cuantitativos y cualitativos.....	66
5.4.1.2.1	Porcentaje de Plan Completado	66
5.4.1.2.2	Causas de No Cumplimiento	68
5.4.1.2.3	<i>Task Made Ready</i>	68
5.4.1.2.4	<i>Task Anticipated</i>	69
5.4.1.2.5	Entrevista semiestructurada	70
5.4.2	Escenario 2	70
5.4.2.1	Modelo BIM 3D.....	71
5.4.2.2	Modelo BIM 4D.....	73
5.4.2.3	Planificación semanal	75
5.4.2.4	Medición de indicadores cuantitativos y cualitativos.....	78
5.4.2.4.1	Porcentaje de Plan Completado	78
5.4.2.4.2	Causas de No Cumplimiento	78

5.4.2.4.3	<i>Task Made Ready</i>	78
5.4.2.4.4	<i>Task Anticipated</i>	78
5.4.2.4.5	Entrevista semiestructurada	79
5.4.3	Limitaciones	79
CAPÍTULO 6: ANÁLISIS DE RESULTADOS		80
6.1	Análisis del flujo de comunicación	80
6.2	Análisis de PPC y CNC	82
6.3	Análisis de Frecuencia de Causas de No Cumplimiento	83
6.4	Análisis de <i>Task Made Ready</i>	85
6.5	Análisis de <i>Task Anticipated</i>	86
6.6	Análisis de entrevista semiestructurada	87
CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		92
7.1	Conclusiones	92
7.1.1	Sobre el <i>Last Planner System</i>	92
7.1.2	Sobre la metodología BIM	92
7.1.3	Sobre el modelo de integración BIM - LPS	93
7.1.4	Sobre los resultados obtenidos en el proyecto de estudio	94
7.2	Recomendaciones	97
BIBLIOGRAFÍA		98

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla. 4.1.1.1 Elementos auxiliares y estructurales en el <i>master schedule</i>	40
Tabla. 4.1.2.1 Elementos auxiliares y estructurales en el <i>phase schedule</i>	43
Tabla. 4.1.3.1 Elementos auxiliares y estructurales en el <i>lookahead planning</i>	45
Tabla. 5.4.2.1 Descripción de la implementación de modelos BIM.....	71
Tabla. 5.4.2.1.1 Elementos modelados según la propuesta del nivel de desarrollo...	72
Tabla. 5.4.2.3.1 Dinámica de la reunión de la planificación – Escenario 2	78



LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

ACI:	Sistemas de agua contra incendio
BIM:	<i>Building Information Modeling</i>
BIM 3D:	Modelo tridimensional
BIM 4D:	Modelo tridimensional agregado el factor tiempo
CBA:	<i>Choosing by Advantages</i>
CIFE:	<i>The Center for Integrated Facility Engineering</i>
CNC:	Causas de no cumplimiento
DBB:	<i>Design Bid Build</i>
IGLC:	<i>International Group for Lean Construction</i>
INEI:	Instituto nacional de estadística e informática
LCI:	<i>Lean Construction Institute</i>
LOD:	<i>Level of development</i>
LPDS:	<i>Lean Project Delivery System</i>
LPS:	<i>Last Planner System</i>
PDM:	<i>Product Data Managment</i>
PPC:	Porcentaje de plan completado
RFI:	<i>Request for information</i>
TA:	<i>Task Anticipated</i>
TMR:	<i>Task Made Ready</i>
VDC:	<i>Virtual Design Construction</i>

LISTA DE FIGURAS

Fig. 3.1.1.1 Infraestructura de pista, puente y edificación.	9
Fig. 3.1.1.2 Información de un elemento en plano 2D, 3D y el modelo BIM 3D.....	9
Fig. 3.1.1.3 Software de Archicad, Tekla y Navisworks.....	9
Fig. 3.1.2.1 Reunión entre los involucrados del proyecto.....	10
Fig. 3.1.2.2 Análisis de propiedades físicas en el modelo.....	11
Fig. 3.1.2.3 El modelo virtual apoya a la resolución de interferencias.....	11
Fig. 3.1.2.4 Documentación extraído del modelo BIM.....	12
Fig. 3.1.2.5 Reunión en obra con modelo 3D&4D.....	12
Fig. 3.1.2.6 Operación y mantenimiento de la edificación.....	13
Fig. 3.1.3.1.1 Tablas de planificación de elementos verticales.....	14
Fig. 3.1.3.2.1 Visualización del modelo con información virtual.....	14
Fig. 3.1.3.3.1 Interferencia entre la tubería de clima e instalación eléctrica.....	15
Fig. 3.1.3.4.1 El constructor aporta constructabilidad.....	16
Fig. 3.1.3.6.1 Simulación 4D.....	17
Fig. 3.1.3.7.1 Modelo 4D con elementos auxiliares.....	17
Fig. 3.1.4.1 Niveles de desarrollo.....	19
Fig. 3.2.1 Flujo enfoque tradicional.....	20
Fig. 3.2.2 Flujo enfoque Lean.....	20
Fig. 3.2.1.1 Sistema tradicional vs Sistema Last Planner.....	21
Fig. 3.2.1.2 Análisis de restricciones en el Lookahead.....	24
Fig. 3.2.1.3 Análisis de restricciones en Commitment Planning.....	25
Fig. 3.2.1.4 Estructuración del Last Planner System.....	27
Fig.3.2.1.5 Relación entre los niveles de planeamiento en el Last Planner System.....	28
Fig. 3.2.2.1 Pasos del método CBA.....	29
Fig. 3.3.1.1 Integración de BIM con LPS.....	32

Fig. 3.3.1.2 Integración del modelo virtual BIM con LPS.....	33
Fig. 3.3.2.1 Porcentaje de plan completado - Caso 1.....	34
Fig. 3.3.2.2 Porcentaje de plan completado - Caso 2a.....	35
Fig. 3.3.2.3 Porcentaje de plan completado - Caso 2b.....	36
Fig. 4.1.1 Integración los modelos virtuales BIM con LPS.....	39
Fig. 4.1.1.1 Modelado de elementos auxiliares.....	41
Fig. 4.1.1.2 Modelo de terreno fragmentado para excavación.....	42
Fig. 4.1.1.3 Modelo de estructuras y elementos auxiliares.....	42
Fig. 4.1.2.1. Modelo de paneles de encofrado.....	43
Fig. 4.1.2.2 Alternativas de sectorización para la cimentación.....	45
Fig. 4.1.3.1 Apuntalado de elementos verticales y horizontales.....	45
Fig. 4.1.3.2 Colocación de acero en elementos verticales y horizontales.....	46
Fig. 4.1.3.3 Distribución de andamios y elementos de accesibilidad.....	46
Fig. 4.1.3.4 Distribución de masas de acopio.....	47
Fig. 4.1.3.5 Ubicación de los elementos de instalaciones.....	47
Fig. 4.1.3.6 Congestión de elementos.....	48
Fig. 4.1.4.1 Programación de tareas - mañana.....	49
Fig. 4.1.4.2 Programación de tareas – tarde.....	49
Fig. 4.1.6.1 Álbum de imágenes a los capataces.....	51
Fig. 4.1.6.2 Revisión de cumplimiento de tareas.....	51
Fig. 4.2.1 Muro modelado hasta el fondo de viga.....	52
Fig. 4.2.2 La losa aligerada cortada a un tercio.....	52
Fig. 4.2.3 Parámetros del elemento.....	53
Fig. 4.2.4 Tabla de cuantificación.....	54
Fig. 4.2.5 Detalle de rampa.....	54
Fig. 4.2.6 Modelado de rampa no recta.....	55

Fig. 4.2.7 Placa modelado como muro.....	55
Fig. 4.2.8 Modelado de apuntalado vertical con grupos de modelo.....	56
Fig. 4.2.9 Filtro de elementos.....	56
Fig. 4.2.10 Filtro de elementos.....	56
Fig. 4.2.11 Plano en AutoCAD sectorizado y Modelo virtual actualizado.	57
Fig. 4.3.1 Conversión de parámetros.....	57
Fig. 4.3.2 Interfaz de Navisworks extendido.....	58
Fig. 4.3.3 Guardado de puntos de vista.	58
Fig. 4.3.4 Creación de conjuntos.	59
Fig. 4.3.5 Asignación automática de elementos a tareas y nomenclatura de tareas. ...	59
Fig. 4.3.6 Asignación de colores a las partidas.	60
Fig. 4.3.7 Creación de nuevos aspectos.....	60
Fig. 5.1.1 Proyecto RESIDENCIAL LA GLORIA II.....	61
Fig. 5.2.1 Estructura organizacional de la obra.....	62
Fig. 5.4.1.1 Cronograma - Escenario 1.	63
Fig. 5.4.1.1.1 Fecha de reuniones - Escenario 1.....	64
Fig. 5.4.1.1.2 Reunión de planificación RGII.....	64
Fig. 5.4.1.1.3 Planta típica y sectorización de elementos horizontales y verticales.	65
Fig. 5.4.1.1.4 Lookahead de la semana 3.....	66
Fig. 5.4.1.2.1.1 Evaluación habitual en el proyecto.....	66
Fig. 5.4.1.2.1.2 Evaluación realizada.....	67
Fig. 5.4.1.2.2.1 Catálogo de Causas de No Cumplimiento.....	68
Fig. 5.4.1.2.3.1 Esquema de tareas.....	68
Fig. 5.4.2.1 Cronograma - Escenario 2.....	70
Fig. 5.4.2.1.1 Modelo con información virtual de la especialidad de Estructuras.....	72
Fig. 5.4.2.1.2 Modelo con información virtual con elementos auxiliares.....	73

Fig. 5.4.2.2.1 Secuencia de operaciones en elementos horizontales.....	74
Fig. 5.4.2.2.2 Secuencia de operaciones en elementos verticales.....	75
Fig. 5.4.2.2.3 Secuencia de operaciones en escaleras.....	75
Fig. 5.4.2.3.1 Fecha de reuniones – Escenario 2.....	75
Fig. 5.4.2.3.2 Reunión de planificación semanal con el modelo virtual.....	76
Fig. 5.4.2.3.3 Layout de reunión de planificación con los capataces.....	76
Fig. 5.4.2.3.4 Presentación de tareas no completadas y PPC.....	77
Fig. 5.4.2.3.5 Presentación de la programación semanal.....	77
Fig. 5.4.2.3.6 Presentación de la programación semanal al personal.....	78
Fig. 6.1.1 Flujo de transmisión de la planificación - Escenario 1.....	80
Fig. 6.1.2 Flujo de comunicación de la planificación - Escenario 2.....	81
Fig. 6.2.1 PPC del proyecto – Escenario 1.....	82
Fig. 6.2.2 PPC del proyecto – Escenario 2.....	82
Fig. 6.3.1 CNC acumulado – Escenario 1.....	83
Fig. 6.3.2 Cuadro estadístico de CNC – Escenario 1.....	84
Fig. 6.3.3 CNC acumulado – Escenario 2.....	84
Fig. 6.3.4 Cuadro estadístico de CNC – Escenario 2.....	84
Fig. 6.4.1 TMR del proyecto – Escenario 1 y Escenario 2.....	85
Fig. 6.5.1 TA mín – TA máx – Escenario 1.....	86
Fig. 6.5.2 TA mín – TA máx – Escenario 2.....	86
Fig. 6.6.1 Resultados de entrevista a los contratistas – Escenario 1.....	87
Fig. 6.6.2 Resultados de entrevista a los subcontratistas – Escenario 1.....	87
Fig. 6.6.3 Resultados de entrevista a los capataces – Escenario 1.....	88
Fig. 6.6.4 Resultados de entrevista a los contratistas – Escenario 2.....	89
Fig. 6.6.5 Resultados de entrevista a los subcontratistas – Escenario 2.....	90
Fig. 6.6.6 Resultados de entrevista a los capataces – Escenario 2.....	90

CAPÍTULO 1: GENERALIDADES

1.1 Introducción

Actualmente, el sector de la construcción, al igual que sector de minería e hidrocarburos, manufactura, comercio y agropecuario, realiza un aporte importante en la economía del Perú (INEI, 2017). Sin embargo, dicho sector presenta una serie de dificultades que evitan su desarrollo.

Entre las principales dificultades se encuentra lo siguiente: presupuesto más ajustado; plazos de construcción más corto; diseño incompatibilizado; alta exigencia de los clientes; poco uso de la tecnología, preocupación de las empresas en elevar su nivel competitivo; baja productividad; y conflictos generados por el entorno de la sociedad, tales como la informalidad en la construcción, la influencia del sindicato y pseudosindicato de trabajadores (Brioso, 2013).

Los problemas mencionados repercuten en la producción en obra y alteran el desarrollo del proyecto. De manera específica, afecta al adecuado desenvolvimiento del equipo frente a las tareas planteadas. Por consiguiente, se genera una brecha considerable entre el trabajo programado y trabajo realizado.

Entre las causas de la variabilidad se obtiene lo siguiente: la baja interacción y coordinación entre los involucrados del proyecto, el bajo entendimiento de la planificación y la falta de comunicación entre los últimos planificadores. Además, se pretende que el cerebro humano pueda ser capaz no sólo de entender un proyecto en planos 2D, sino también, comprender el proceso de ensamblaje de los sistemas con herramientas tradicionales.

Ante la necesidad de mejorar, la industria peruana está implementando gradualmente la metodología *Last Planner System* o Último Planificador, que es una herramienta para el control de producción en el marco del *Lean Project Delivery System (LPDS)*, para la realización de los diferentes proyectos. Este sistema indica que la predicción de los trabajos a ejecutar es más confiable a medida que se acerca el tiempo de ejecución de los mismos: la actividad carece de restricciones y pueden ser planificadas, de tal manera que las actividades planificadas sean realmente las actividades ejecutadas. Por ello, se propone la métrica de porcentaje de plan completado (PPC) como indicador del éxito en la planificación, y la causa de incumplimiento de programación como instrumento para

la mejora continua. De la misma manera, se propone los indicadores de *Task Made Ready* (TMR) y *Task Anticipated* (TA) para evaluar la eficiencia del equipo técnico.

La incorporación del *Last Planner System* (LPS) durante la etapa de ejecución de la obra es de vital importancia; sin embargo, el LPS presenta dificultades en la visualización de la programación y la comunicación entre los involucrados. En vista de ello, se requiere herramientas que ayuden a potenciar la implementación del LPS. Entre ellos, se encuentra la metodología *Building Information Modeling* (BIM) donde una de sus principales herramientas es el modelo virtual 3D&4D, que junto al LPS mejora el performance del proyecto.

La metodología BIM consiste en la unión de modelos virtuales de la construcción, procesos integrados y transparencia en la información. Además, se está implementado en países desarrollados, tales como: Reino Unido, Estados Unidos, Japón, entre otros. BIM no es el desarrollo de un modelo virtual 3D, sino es un proceso integrado que permite una construcción basada en la información coordinada y confiable. Ello se da entre los grupos a cargo del desarrollo del proyecto, desde la etapa de diseño hasta la etapa de operación y funcionamiento (Strafaci, 2008).

En el Perú, solo importantes compañías constructoras como Graña y Montero, Cosapi, Marcan, Constructora Aesa, entre otros, están incorporando la metodología BIM (Comité Bim del Perú); sin embargo, los reportes brindados de la metodología utilizada y los resultados obtenidos son escasos, pues es probable que la metodología BIM no se haya orientado de acuerdo a los principales problemas de las empresas. De otro lado, las empresas constructoras en vías de desarrollo aún mantienen el sistema tradicional Diseño-Licitación-Construcción y un reducido grupo de estas empresas están implementando la filosofía Lean Construction.

Asimismo, existe poco reporte de literatura académica peruana sobre cómo integrar BIM al proceso constructivo, a través de modelos BIM+ (e.g. 4D planning) y su integración con los actuales modelos de gestión del proceso constructivo (e.g. Last Planner System). Entre ellos, se encuentran la investigación realizada por Orihuela et al. 2015 y el modelo conceptual presentado por Bhatla y Leite (2007).

Ello, conlleva a elaborar un modelo de integración entre el modelo virtual BIM, que incluirá elementos auxiliares propios de construcción, y *Last Planner System*, que considerará dos programaciones al día. El objetivo es mejorar la visualización, la comunicación y la confiabilidad de la reunión de planificación semanal. Asimismo, se

busca facilitar su uso para empresas en crecimiento y reportar los beneficios para un esparcimiento de este conocimiento a los círculos profesionales y académicos.

1.2 Antecedentes

En la industria de la construcción existe una alta variabilidad entre el trabajo planificado en gabinete y el trabajo desarrollado en el campo (Ballard, 1999) que trae como resultado retrasos en los plazos de construcción, deficiencias en la calidad y sobrecostos.

La variabilidad se atribuiría a factores contextuales como: el tamaño de la empresa constructora, la implementación de nuevos sistemas de gestión y procesos constructivos (Guio, 2001), así como el grado de subcontratación y la implementación de herramientas en la reunión de planificación semanal.

La mayoría de empresas constructoras peruanas implementan el *Last Planner System* durante la planificación de proyectos. Sin embargo, la comunicación con los subcontratistas y la visualización del proceso constructivo puede ser potenciada a través del uso de modelos virtuales. De manera específica, el problema es que existe un vacío en cómo se integra *Last Planner System* con *Building Information Modeling* durante la construcción de un proyecto de edificación en el ámbito peruano, que permita mejorar el performance, la visualización, la comunicación y la confiabilidad en la programación.

La confiabilidad de la planificación se puede mejorar con el aporte que brinda un modelo virtual que incluya elementos auxiliares propios de construcción, pues mejora la gestión visual a nivel de operaciones y evita interpretaciones ambiguas (O'Connor, 2013). Asimismo, visualizar dos programaciones al día, mañana y tarde, permite la mejora de la visualización del proceso constructivo, puesto que usualmente se programan más de una actividad al día en una localización (Murguía, D.; Brioso, X, 2017). La combinación de los elementos auxiliares y la elaboración de dos programaciones al día permiten mejorar la comunicación con los subcontratistas y la distribución logística interna de la obra en comparación a la planificación basada en planos 2D y tablas de Excel, que es una de las causas de la baja productividad y dificulta la comunicación entre el contratista y el personal (Mourgues et al. 2007).

1.3 Justificación

Es enriquecedor implementar la herramienta de modelos virtuales BIM 3D&4D para potenciar el efecto del LPS (Orihuela et al. 2015), de modo que se visualice claramente

el alcance semanal, se facilite la comunicación entre los involucrados y mejore la confiabilidad de la programación. De esta manera, se optimiza el costo, se reduce el tiempo y se mejora la calidad de la edificación. Asimismo, es importante adaptar el modelo de integración a las empresas que se encuentran en crecimiento y facilitar su inserción en las nuevas metodologías que se están desarrollando en el mundo.

1.4 Pregunta de investigación

En el desarrollo de la presente investigación se responderá a las siguientes preguntas:

- ✓ ¿De qué manera se integra el *Last Planner System* y los modelos virtuales BIM 3D&4D en la etapa de ejecución de la estructura del proyecto?
- ✓ ¿Cuál es el nivel de detalle de los componentes virtuales que corresponde en cada etapa del LPS?
- ✓ ¿Los elementos auxiliares mejora el entendimiento de la logística interna de la obra?
- ✓ Elaborar dos programaciones al día, ¿mejora el entendimiento de las tareas diarias?
- ✓ ¿La implementación de modelos virtuales BIM 3D&4D mejora la visualización, la comunicación y la confiabilidad de la programación semanal?
- ✓ ¿Existen barreras de implementación propias de la cultura peruana?

1.5 Objetivo

Objetivo general:

- En base a la literatura, desarrollar un modelo de sinergia de *Last Planner System* y BIM e implementar dicho modelo al nivel de programación semanal a través de la participación directa del tesista en campo.

Objetivos específicos:

- Revisar la literatura existente acerca de la sinergia LEAN - BIM y de la interacción entre el modelo BIM 3D&4D y el *Last Planner System*.
- Desarrollar un modelo de integración entre *Last Planner System* y un modelo BIM para la especialidad de Estructuras, con especificación de niveles de desarrollo BIM para cada etapa del *Last Planner*.
- Implementar los modelos virtuales en un proyecto de edificación en las reuniones de planificación semanal y compararla con una etapa previa sin modelos virtuales. Complementar las observaciones de campo con encuestas a los participantes de las reuniones semanales.

- Procesar la información y analizar los resultados durante y al final de la implementación.
- Elaborar conclusiones y recomendaciones de la implementación del modelo virtual BIM 3D&4D al *Last Planner System* en un proyecto de edificación.

1.6 Alcance

En base a la literatura, se elaborará un modelo de integración entre el modelo BIM para la especialidad de Estructuras y el *Last Planner System*.

Se implementará el modelo virtual BIM 3D&4D al *Last Planner System*, con el objetivo de mejorar la visualización, comunicación y la confiabilidad de la programación en la etapa de construcción de la especialidad de estructuras de una vivienda multifamiliar.

El caso de estudio constará de dos partes. El primer escenario durará 4 semanas, se planificará en base al LPS y se medirá los indicadores siguientes: *Task Made Ready*, *Task Anticipated*, Porcentaje de Plan Completado, y Causas de No Cumplimiento. El segundo escenario durará 5 semanas, se planificará en base al LPS integrado con modelos virtuales BIM y se medirá los indicadores mencionados. Al final de la implementación, se entrevistará a los participantes de las reuniones semanales.

La entrevista semiestructurada, analizará la mejora de la visualización y la comunicación en la reunión de planificación. La entrevista se aplicará a los tres siguientes grupos: contratista, subcontratista y capataz.

Finalmente, se analizará los resultados obtenidos y se elaborará conclusiones y recomendaciones.

1.7 Delimitación de la investigación

Respecto a los entregables del tesista, el presente trabajo presenta las siguientes limitaciones:

- En el caso de estudio, el modelo de integración se aplicará para el nivel de programación semanal, ejecución y evaluación de resultados.
- El modelo virtual solo se realizará para la especialidad de estructuras, desde la cimentación hasta el 6to nivel.
- En la programación semanal, solo se considerará las partidas de acero, encofrado, concreto, instalaciones sanitarias e instalaciones eléctricas.

CAPÍTULO 2: MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

2.1 Revisión de literatura

La consulta bibliográfica sobre *Visual Management*, *Lean Construction*, *Building Information Modeling*, *Last Planner System*, sinergia BIM - Lean, se realizará a través de la publicación de diferentes artículos de investigación difundidos por *The International Group for Lean Construction*, libros electrónicos e investigaciones desarrolladas y publicadas sobre las plataformas electrónicas Scopus, Google Scholar y Science Direct.

2.2 Desarrollo del modelo de integración

Se elaborará la sinergia entre BIM y Lean y se definirá criterios de modelado.

2.2.1 Integración del modelo virtual 3D&4D BIM al LPS

En base a la literatura, se elaborará un modelo de integración entre la herramienta de *Last Planner System* con los modelos virtuales BIM 3D&4D. El modelo se orientará a la etapa de ejecución del casco estructural de un proyecto mediano.

2.2.2 Criterios de modelado 3D

El modelado 3D de la especialidad de estructuras se desarrollará en el software Revit. Para ello, se establecerá el nivel de desarrollo de los elementos y se describirá los criterios de modelado que faciliten la elaboración del modelo virtual 3D.

2.2.3 Criterios de modelado 4D

El modelado 4D se elaborará en el software Navisworks. Para ello, el cronograma de avance de obra se desarrollará directamente en dicho software, a fin de enlazar las tareas programadas con los componentes del modelo virtual 3D. Asimismo, se brindará los criterios de modelado para facilitar la preparación del modelo 4D.

2.3 Caso de Estudio

El caso de estudio constará de dos escenarios. El primer escenario planificará con la herramienta LPS y el segundo escenario, implementará el modelo virtual BIM al LPS.

2.3.1 Planificación semanal

Se participará en la reunión de planificación de ambos escenarios. Pero, en el escenario 2 se interactuará con los planificadores habituales. Además, se añadirá una sesión entre

el contratista y los capataces, para analizar la programación semanal. Finalmente, se visitará el proyecto continuamente, a fin de seguir las tareas programadas.

2.3.2 Medición de indicadores cuantitativos y cualitativos

En ambos escenarios, se medirá el indicador cuantitativo de PPC, CNC, TMR y TA y se evaluará el indicador cualitativo en base a entrevistas semiestructuradas.

2.3.2.1 Porcentaje de plan completado

Al concluir la semana de trabajo, se determinará la cantidad de tareas concluidas sobre la cantidad de tareas planificadas, el resultado se expresa en porcentaje.

2.3.2.2 Causas de no cumplimiento

Se evaluará la CNC de las tareas no concluidas, para evitar incidir en el mismo error.

2.3.2.3 *Task Made Ready*

Se evaluará la cantidad de tareas anticipadas sobre las tareas prometidas hace una semana y se analizará la eficiencia del equipo para levantar las restricciones.

2.3.2.4 *Task Anticipated*

Se determinará la cantidad de tareas anticipadas respecto a las tareas planificadas en la misma semana y se medirá la eficiencia del equipo para predecir las actividades.

2.3.2.5 Entrevista Semiestructurada

Al finalizar la implementación, se entrevistará presencialmente a los participantes del proyecto, a fin de conocer su apreciación respecto a la planificación basada en planos 2D y cuadros de Excel y a la planificación implementada con modelos virtuales BIM.

2.4 Análisis de resultados

En base a los datos recolectados, se analizará los resultados obtenidos en ambos escenarios, es decir, se comparará los indicadores cuantitativos como TMR, TA, PPC, y CNC y se evaluará las respuestas obtenidas en la entrevista semiestructurada.

2.5 Conclusiones y recomendaciones

Se evaluará el beneficio de la herramienta usada, el impacto que originará en los últimos planificadores y se resumirá las recomendaciones, para obtener un resultado favorable.

CAPÍTULO 3: REVISIÓN DE LA LITERATURA

3.1 *Building Information Modeling*

3.1.1 Definición de BIM

Product Data Management es un proceso que fue desarrollado en la industria de manufactura, el cual vincula los datos concernientes a un producto a una base de datos. La información del producto incluye modelos, información de sus partes, proveedores, requerimientos, notas, documentos adicionales, entre otros (Siemens, 2015).

De manera similar, BIM consiste en el desarrollo de un proceso integrado aplicado a la industria de la construcción. Además, BIM gestiona la información necesaria para el desarrollo de una edificación las fases siguientes: pre-diseño, diseño, construcción, operación y mantenimiento.

La metodología BIM ha sido desarrollada por el docente Charles M. Eastman bajo el nombre de *Building Product Model*. No obstante, Jerry Laiserin popularizó el término BIM como una representación digital de los procesos de edificación para facilitar el intercambio y la interoperabilidad de información en un formato digital. Finalmente, en 1987, Graphisoft's ArchiCAD sería el primero en implementar BIM bajo el concepto de construcción virtual (Forbes & Ahmed, 2011).

Además, Eastman et al. 2008 menciona lo siguiente: "BIM es usado como verbo o adjetivo para describir herramientas, procesos y tecnologías que son facilitadas por una documentación digital sobre el funcionamiento, planeamiento, construcción y la operación de una edificación".

Asimismo, Adam Strafacci (2008) considera que el modelado de información no es software. Sino, es un proceso cimentado en la información coordinada y confiable de un proyecto, desde su diseño hasta su operación y mantenimiento. También, los principios de BIM son válidos para obras de infraestructura.

Building:

En el área de construcción refiere a la acción de edificar diferentes tipos de infraestructura, tales como autopistas, puentes, edificios, entre otros. A continuación, algunos ejemplos:



Fig. 3.1.1.1 Infraestructura de pista, puente y edificación.
Fuente: Presentado por Tecnología BIM

Information:

Refiere a la acción de informar, ampliar y precisar el conocimiento que se dispone de una determinada materia. En la industria de la construcción se requiere informar acerca del diseño de un producto, proceso constructivo, proveedores disponibles y capacitados, equipos necesarios, entre otros.

En las siguientes imágenes se muestra la diferencia entre una cimentación en un plano 2D, un objeto 3D CAD y un modelo BIM 3D, que brinda las características siguientes: material; espesor del cimiento; área de encofrado; área de solado; y volumen de excavación.

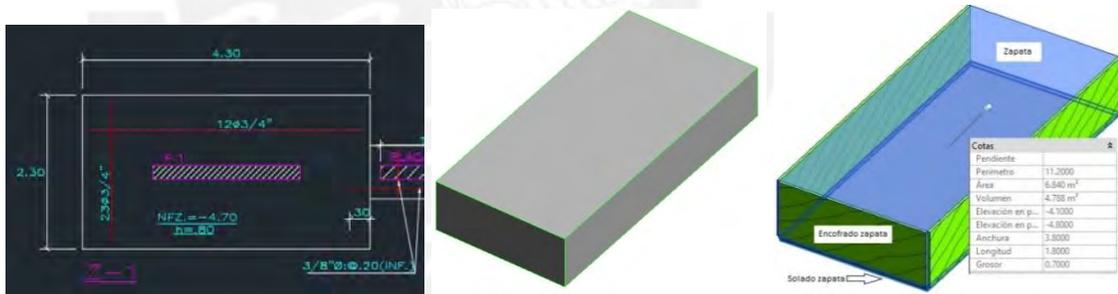


Fig. 3.1.1.2 Información de un elemento en plano 2D, 3D y el modelo BIM 3D.
Fuente: Elaboración propia

Modeling:

Es una aproximación virtual en tres dimensiones, pues no representa la realidad. Ello se logra en base a la programación orientada a objetos. A continuación, se muestran diferentes softwares que son de utilidad, tales como Archicad, Tekla, entre otros.



Fig. 3.1.1.3 Software de Archicad, Tekla y Navisworks.
Fuente: Google

3.1.2 Aplicaciones

BIM se puede implementar en las distintas etapas del ciclo de vida de una edificación, entre los cuales se dispone lo siguiente:

Etapa de diseño:

Se desarrolla el modelo y la información de un proyecto en base al trabajo coordinado con los representantes de las diferentes especialidades, tales como Cliente, Arquitectura, Estructuras, Instalaciones Mecánicas, Instalaciones Sanitarias, Instalaciones Eléctricas, Constructor, Proveedor, entre otros.

Además, la representación de proyectos con geometrías complejas en gráficos 2D es complicada, por lo que, al utilizar un modelo 3D todos desarrollan el mismo concepto. Ello, facilita el trabajo interactivo con los demás especialistas.

Asimismo, su implementación requiere de personas externas que gestionen el flujo de la información. Entre los cuales se encuentran un líder o BIM manager, un facilitador y un recorder. A continuación, se presenta el modelo de una reunión de coordinación.



*Fig. 3.1.2.1 Reunión entre los involucrados del proyecto.
Fuente: Presentado en Canon Solutions América*

De igual forma, la variedad de alternativas de diseño permite analizar el desempeño de la edificación en términos de integridad estructural, el control de la temperatura, la ventilación, la distribución y consumo de energía, la acústica, el uso de cargas externas, entre otros (Eastman et al. 2008). En base a lo anterior, se elige el diseño más económico y confortable para el cliente.

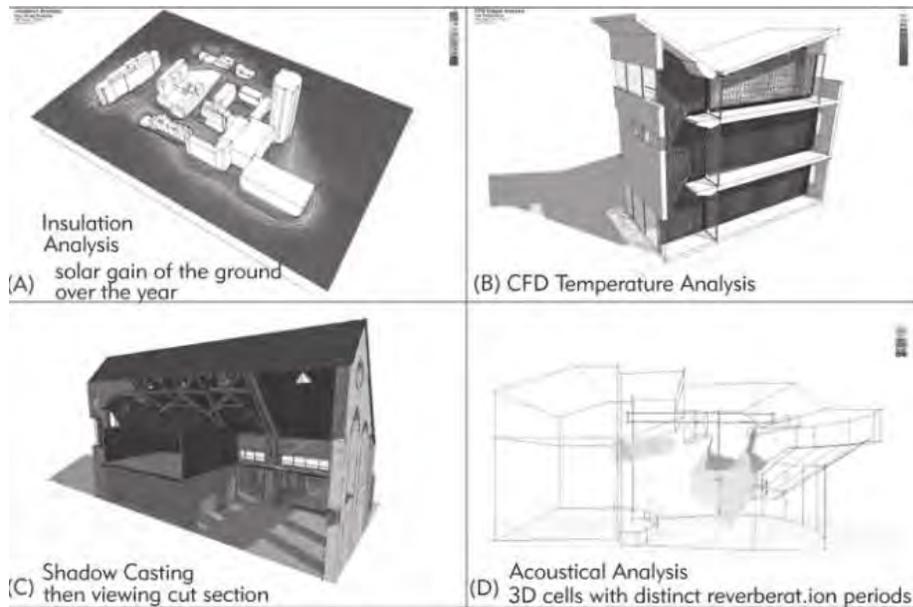


Fig. 3.1.2.2 Análisis de propiedades físicas en el modelo.

Fuente: (Eastman et al. 2008)

Etapa de revisión del diseño:

Se adecúa para el ámbito peruano que aún mantiene el sistema tradicional. Es decir, luego de obtener el expediente técnico del proyecto, se implementa la herramienta de modelos virtuales BIM durante el proceso de compatibilizar las especialidades.

Al igual que en la etapa de diseño, requiere la presencia de los representantes de las especialidades para resolver las dificultades identificadas durante la elaboración del modelo virtual y así, anticiparse a los problemas en campo.

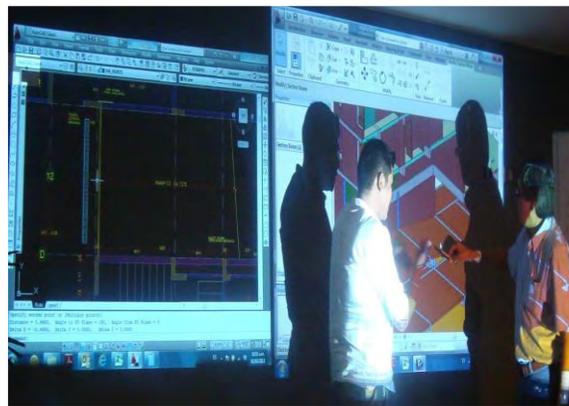


Fig. 3.1.2.3 El modelo virtual apoya a la resolución de interferencias.

Fuente: (Murguía, 2015)

Finalmente, la documentación de planos de planta, cortes y elevaciones se extrae del modelo BIM automáticamente.

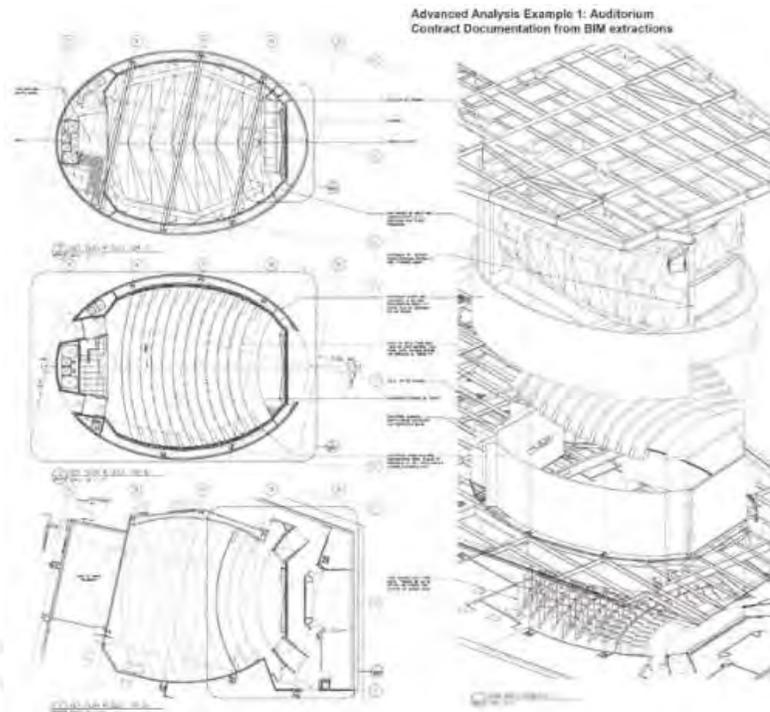


Fig. 3.1.2.4 Documentación extraído del modelo BIM.
Fuente: (Eastman et al. 2008)

Etapa de construcción:

El uso de BIM durante la etapa de la construcción está evolucionando de manera rápida, dado que desarrolla un proceso planificado que ahorra tiempo y dinero, así como reduce la posibilidad de incurrir frecuentemente en trabajos rehechos (Dave et al. 2013).

Además, la implementación BIM involucra un sin número de beneficios, entre los cuales se encuentra lo siguiente: la detección de interferencias; análisis de constructabilidad y planeamiento; visualización de las actividades; evita interpretaciones ambiguas; facilita el entendimiento al personal; y genera metrados para logística y control de avance real.



Fig. 3.1.2.5 Reunión en obra con modelo 3D&4D.
Fuente: Elaboración propia

Etapa de operación y mantenimiento:

Al término del proceso de ejecución, se presenta los planos *as-built*, que generalmente, son archivados por el cliente y se usan ante posibles mejoras de la edificación. Sin embargo, dado que la información del proyecto se registra sobre planos 2D, se dificulta la lectura y la comprensión de la edificación. En contraste, BIM almacena la información real del proyecto en un modelo virtual. Dicha información refiere a los equipos instalados, tales como ubicación, garantía, ciclo de vida, inventario, entre otros, de modo que facilita el entendimiento y reduce el tiempo de mantenimiento (Dave et al. 2013).



Fig. 3.1.2.6 Operación y mantenimiento de la edificación.
Fuente: (Mourgues, 2012)

3.1.3 Beneficios

Desde la etapa de la concepción del proyecto hasta su operación y mantenimiento, la implementación BIM brinda beneficios significativos para las personas involucradas en las distintas fases del proyecto. Entre los cuales se obtiene lo siguiente:

3.1.3.1 Metrado

El modelo tridimensional provee información de los elementos que fueron diseñados. Por ello, se incluye información relacionada a cada objeto, tales como precio, tipo de material, características especiales y se emite a través de tablas.

Asimismo, se utiliza para solicitar pedidos de materiales, volumen de concreto, cantidad de accesorios como puertas, ventanas e inodoros a los proveedores. También, permite obtener el metrado planificado y el metrado de avance de obra.

En la siguiente imagen, la tabla de planificación informa distintas características del elemento modelado.

<5.0 S - Verticales Piso 03 - Concreto>					
A	B	C	D	E	F
Elemento	Nivel del Elemento	Concreto (m3)	Comentarios	Sector	Material: Como pint
Columna G	Piso 03	1.14 m ³	Elementos verti	Sector 1	No
Columna G	Piso 03	0.88 m ³	Elementos verti	Sector 1	No
Columna G	Piso 03	0.00 m ³	Elementos verti	Sector 1	No
Columna G	Piso 03	0.84 m ³	Elementos verti	Sector 1	No
Columna G	Piso 03	0.00 m ³	Elementos verti	Sector 1	No
Placa G	Piso 03	1.36 m ³	Elementos verti	Sector 1	No
Placa G	Piso 03	0.91 m ³	Elementos verti	Sector 1	No
Placa G	Piso 03	1.57 m ³	Elementos verti	Sector 1	No
Placa G	Piso 03	1.13 m ³	Elementos verti	Sector 1	No
Placa G	Piso 03	1.24 m ³	Elementos verti	Sector 1	No
Sector 1: 10		9.03 m ³			

Fig. 3.1.3.1.1 Tablas de planificación de elementos verticales.
Fuente: Elaboración propia

3.1.3.2 Visualización

Mejora la comunicación y el entendimiento entre los involucrados y el cliente. Asimismo, es posible producir recorridos de alta calidad en función a las necesidades y en la etapa en que se encuentren los usuarios. Por ende, genera un ahorro de tiempo a la hora de tomar decisiones, pues no es necesario revisar varios planos para la interpretación de una interferencia.

En la etapa de construcción, facilita el entendimiento del proyecto al grupo constructor. Por ello, no requiere que las personas conozcan ampliamente la lectura de planos. Así como, al realizar un modelo 4D se obtiene un beneficio extra, que es la integración entre el diseño y la construcción (Aliaga, 2012).



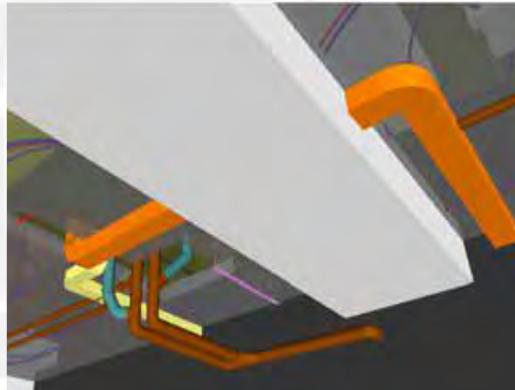
Fig. 3.1.3.2.1 Visualización del modelo con información virtual.
Fuente: Elaboración propia

3.1.3.3 Resolución de Incompatibilidades

Debido a que, las interferencias entre las diversas especialidades se dan a menudo durante la etapa de la construcción, se generan un aumento en el costo y plazo del proyecto. Asimismo, entre la especialidad de arquitectura y estructura se da la mayor cantidad de cruces; sin embargo, la cantidad de problemas detectadas entre las instalaciones no dejan de ser importantes.

Al contar con un modelo 3D, se ahorra tiempo en realizar modificaciones y documentarlos. Además, su visualización permite una rápida toma de decisiones entre los especialistas a cargo.

A continuación, se observa la incompatibilidad entre la tubería de clima y la tubería de instalación eléctrica.



*Fig. 3.1.3.3.1 Interferencia entre la tubería de clima e instalación eléctrica.
Fuente: (Mourgues, 2012)*

Existen distintos niveles de interferencias entre las especialidades. Entre ellos se ubican los siguientes:

✓ Choques duros:

Las interferencias involucran razones de seguridad para los usuarios. Por ello, influyen notablemente en el costo, plazo y calidad del proyecto. Por ejemplo, el cruce entre el ducto de sanitario y la tubería de instalaciones eléctricas, cruce de tuberías con vigas centrales, entre otros.

✓ Choques blandos:

Las incompatibilidades incluyen errores gráficos en el plano Autocad o errores de diseño, que influyen de manera media o baja en los objetivos del proyecto.

- ✓ Posiciones incorrectas y mejorables:

Se da al realizar una inadecuada distribución de los elementos eléctricos, sanitarios y mecánicos, pues es posible mejorar la posición de las tuberías para una mejor construcción y mantenimiento de los elementos (Mourgues, 2012).

3.1.3.4 Aporte de constructabilidad

La constructabilidad es la óptima utilización del conocimiento y la experiencia de la construcción en la etapa de diseño, planificación y en el manejo de las operaciones en el campo, a fin de alcanzar el objetivo del proyecto (Orihuela, P & Orihuela, J, 2003).

Es importante el aporte del grupo constructor en la etapa de diseño del proyecto, ya que la amplia experiencia que se obtiene en el campo suple el escaso conocimiento constructivo del grupo diseñador. El aporte mencionado consiste desde la selección de los materiales hasta los procesos constructivos más complejos de ejecutar.

El modelo 4D permite una adecuada visualización de la secuencia de actividades en una escala temporal. Luego, se analiza si los frentes de trabajo son factibles o existen obras adicionales que se debe desarrollar.



Fig. 3.1.3.4.1 El constructor aporta constructabilidad.
Fuente: (Murguía, 2015)

3.1.3.5 Reducción de *Request For Information*

La cuantiosa cantidad de *RFI* o consultas que se realiza a los especialistas es uno de los principales problemas de la construcción, pues el tiempo de espera de la resolución de la incompatibilidad incrementa el costo y la duración del proyecto.

La consulta se origina por la falta de información y detalle del proceso constructivo. Según el diagnóstico realizado por el Ing. Orihuela a 100 proyectos se reporta lo siguiente: solo el 8% ha coordinado con todos los especialistas; el 58% solo ha compatibilizado la especialidad de estructuras y arquitectura; y el 33% solo ha coordinado con un especialista (Orihuela et al. 2008). Por ello, existe una alta probabilidad de hallar interferencias y/o diseños que no son claros para el constructor.

3.1.3.6 Secuencia de construcción

Durante el proceso de ejecución, el modelo 4D desarrolla una secuencia constructiva para todos los componentes de la edificación (Forbes, L. & Ahmed, S., 2011). Asimismo, genera presentaciones para los usuarios interesados en la evolución del proyecto a lo largo del tiempo, es decir, subcontratas, clientes, proveedores, etc.

A continuación, se muestra el desarrollo de un proyecto a lo largo del tiempo:

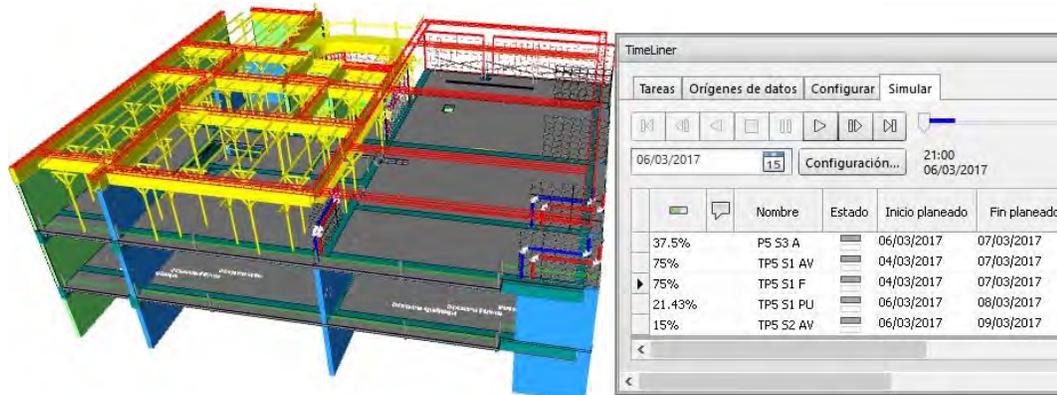


Fig. 3.1.3.6.1 Simulación 4D.
Fuente: Elaboración propia

3.1.3.7 Resolución de conflictos de espacio

Según McKinney (1998), el modelo 4D ayuda a identificar conflictos potenciales entre los elementos de construcción. Por ello, se propone modelar elementos auxiliares propios de construcción, a fin de evaluar el espacio disponible para la acumulación de elementos temporales, tales como encofrado, acopio de acero, acopio de cemento, entre otros. Además, permite analizar la congestión del espacio de trabajo y la interferencia entre trabajadores, lo cual se puede predecir y minimizar (Wang, 2007).

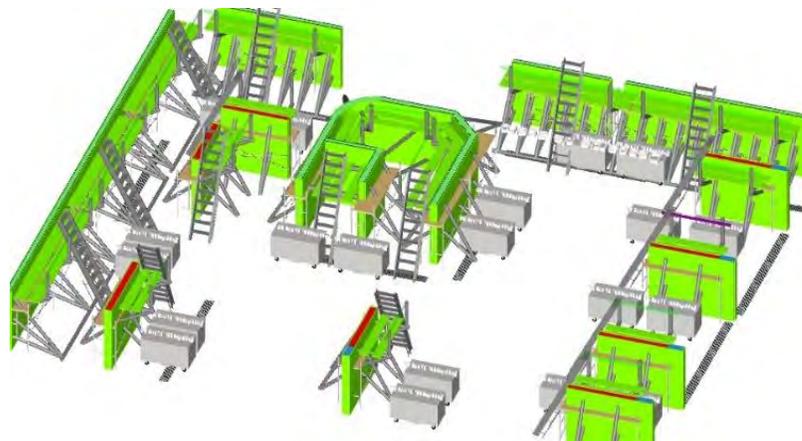


Fig. 3.1.3.7.1 Modelo 4D con elementos auxiliares.
Fuente: Elaboración propia

3.1.4 *Level of Development*

Es importante diferenciar entre *Level of Detail* y *Level of Development*, dado que ambos presentan los mismos acrónimos, LOD. Por un lado, el nivel de detalle es la cantidad de información que se incluye en un elemento modelado. Por ejemplo, a una columna se agrega la información de tipo de material, proveedor, costo, etc. Por otro lado, el nivel de desarrollo es la información útil que brinda el modelo geométrico a los miembros del equipo. Por ejemplo, en la planificación, el modelo brinda metrado de concreto y área de encofrado, sectorización y constructabilidad.

A medida que el proyecto avanza, cada elemento modelado adquiere un determinado nivel de desarrollo. Según el documento “*Level of Development Specification*”, se detalla 5 niveles de desarrollo. Para ello, BIMForum considera el documento G202™ – 2013 presentado por *American Institute of Architects*, y agrega el LOD 350. Sin embargo, la convención UK considera 7 niveles de desarrollo (Davies, 2014).

A continuación, se describe las principales características de los niveles de desarrollo:

LOD 1_{UK}: El modelo comunica el desempeño de los requerimientos y las restricciones del lugar. Por ello, las edificaciones pueden ser modeladas como bloques.

LOD 2_{UK} - LOD 100_{US}: El modelo conceptual o de masa es representada como un sistema genérico que incluye información básica de áreas y volúmenes, orientación y costo.

LOD 3_{UK} - LOD 200_{US}: El elemento brinda información aproximada de áreas y volúmenes, forma, orientación, ubicación y localización. Además, información no gráfica puede ser añadida al elemento.

LOD 250: El modelo brinda información aproximada de tamaño, forma, cantidad, ubicación, orientación. Ha sido implementado para una adecuada constructabilidad y secuencia de actividades.

LOD 4_{UK} - LOD 300_{US}: El modelo representa el fin de la etapa de diseño. El elemento es representado gráficamente y contiene información precisa de forma, orientación, ubicación, tamaño, cantidad y material. El modelo brinda información confiable de metrados de concreto y encofrado. Este LOD puede ser usado para la producción de documentos 2D de la construcción tradicional.

LOD 350: El modelo brinda información de tamaño, forma, cantidad, ubicación, orientación y es capaz de interactuar con modelos de otros sistemas. El material está definido y ha sido implementado con geometría adicional para una adecuada constructabilidad. Asimismo, facilita la migración hacia el modelo 400.

LOD 5_{UK} - LOD 400_{US}: El modelo transmite suficiente información para la fabricación, ensamblaje e instalación del elemento. Para ello, se implementa información 2D tales como dimensiones, notas, etc.

LOD 6_{UK} - LOD 500_{US}: El modelo contiene información real de cada elemento construido y es viable para el mantenimiento y operaciones del proyecto.

LOD 7_{UK}: La información del modelo es usado para las operaciones, mantenimiento y desempeño y monitoreo.

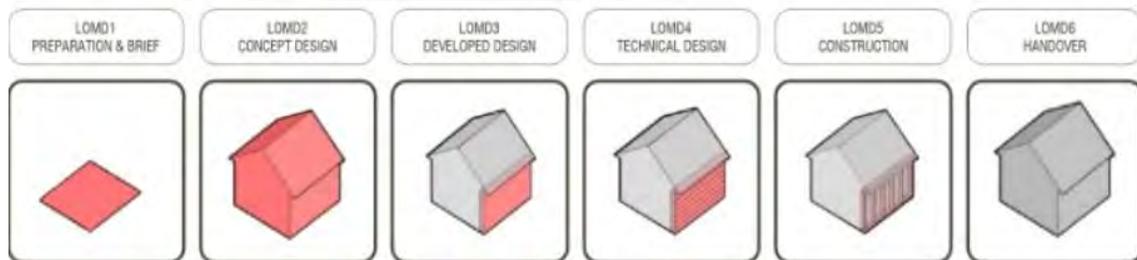


Fig. 3.1.4.1 Niveles de desarrollo.
Fuente: (Davies, 2014)

En la presente investigación, se utilizará el nivel de desarrollo 100, 200, 250, 300 y 350. En el modelo de integración se detalla el LOD para cada nivel del LPS.

3.2 *Lean Construction*

El término *Lean* refiere a eliminar los desperdicios o pérdidas que no agregan valor al producto final y presentan un costo. El sistema de producción japonés, *Toyota Production System* (TPS), denominado sistema *Lean Production* o *Lean Manufacturing* ha sido la base principal para el desarrollo del *Lean Construction*.

La filosofía *Lean Construction* se ha definido de diferentes maneras. Entre lo más representativo se dispone de lo siguiente: Greg Howell y Glenn Ballard, co-fundadores de *Lean Construction Institute*, definen como el nuevo camino de gestionar la industria de la construcción, en el cual los objetivos, principios y técnicas de una construcción sin pérdidas forman la base para el desarrollo de un nuevo proceso de entrega de proyecto.

A su vez, *The Construction Industry Institute* define como el continuo proceso de eliminar los desperdicios, donde el producto final supera los requisitos mínimos establecidas por el cliente y busca la perfección en la ejecución de un proyecto (Forbes, L. & Ahmed, S., 2011).

Actualmente, se busca reducir el uso del proceso tradicional de producción en la construcción que consiste en las tres fases siguientes: planificación, donde se detalla las tareas, pero no considera la variabilidad ni el flujo entre dos actividades; ejecución, se transmite órdenes para realizar las actividades planificadas en el cronograma; y control, donde se verifica el cumplimiento de los mínimos requerimientos del proceso realizado al finalizar el trabajo. Este proceso, no considera los efectos producidos por las actividades que existen entre los subprocesos.



Fig. 3.2.1 Flujo enfoque tradicional.
Fuente: (Brioso, 2013)

En vista de ello, el enfoque Lean considera el sistema de producción de la construcción como un flujo de procesos, el cual prioriza la reducción y/o eliminación de las pérdidas de cada proceso. Además, al desmenuzar los procesos en sub-procesos es más sencillo identificar procesos que no agregan valor. De modo que, se incrementa el valor al producto final. De esta manera, se evita la insatisfacción del cliente, se facilita la inspección, se reduce la variabilidad y se aprende en base a la mejora continua (Guzmán, 2014).



Fig. 3.2.2 Flujo enfoque Lean.
Fuente: (Guzmán, 2014)

Lean Project Delivery System (LPDS):

Fue desarrollado por Glenn Ballard en el año 2000, donde la industria tradicional realizaba por separado los roles de diseñadores y constructores. El LPDS analiza las actividades, de los profesionales mencionados, como un proceso continuo interrelacionado, con metas orientadas a los objetivos del proyecto, que son maximizar el valor agregado y minimizar el desperdicio (Forbes, L. & Ahmed, S., 2011).

La metodología LPDS plasma los principios Lean a las diferentes etapas del ciclo de vida de un proyecto, desde el pre-diseño hasta su uso (Guzmán, 2014). A continuación, se destaca la fase relacionada a la construcción del proyecto:

Lean Assembly

Esta fase se denomina ‘instalación en el sitio’, ya que comprende la entrega de materiales, equipos y mano de obra, es decir, abastecimiento de logística para realizar una actividad especificada en el diseño. Para el control de calidad se usa la herramienta *Last Planner System*.

Se han desarrollado 42 herramientas del LPDS. En la etapa de control de producción, la principal herramienta es el LPS, que comprende las etapas siguientes: *master schedule*; *phase schedule*; *lookahead* en el horizonte; *commitment planning*; y *la medición de indicadores*.

3.2.1 Last Planner System

En el proceso tradicional, las actividades realizadas (denominada como ‘se hizo’) difiere de las actividades contempladas en el *lookahead* y en la programación semanal. En consecuencia, existe un control inadecuado de las actividades. Sin embargo, en el proceso de implementación del LPS, las actividades realizadas presentan una variación mínima respecto a las tareas que se deberían realizar. Así, mejora el control de las actividades programadas. Por ello, se plantea el uso del LPS como herramienta de planificación.



Fig. 3.2.1.1 Sistema tradicional vs Sistema Last Planner.
Fuente: Elaboración propia

La concepción inicial del LPS ha ido cambiando a lo largo del tiempo. Al inicio, se diseñó el LPS para incrementar la similitud entre el trabajo que se realizará y el trabajo realizado. Para ello, se estableció la regla de programar solo las tareas que están bien definidas,

secuenciadas y dimensionadas para la capacidad del constructor. Sin embargo, se hizo evidente que el PPC puede ser 100% y que el proyecto se retrase en la programación general. Para ello, se añadió el proceso de *Lookahead*, y, aun así, esta herramienta reveló la insuficiencia de la programación y se agregó el *pull planning*, cuya función es detallar las fases y procesos en el *master* y *phase schedule* y desglosar las tareas en todos los niveles (Ballard, G & Tommelein, I, 2016). A continuación, se describe las principales funciones, las presuposiciones y convenciones, y los principios y reglas del LPS desarrolladas por Ballard (2016).

Funciones:

- Planear las actividades para alcanzar el objetivo del proyecto.
- Realizar el análisis de restricciones junto a los especialistas para que sea confiable.
- Seleccionar las tareas para la planificación diaria y planificación semanal y preparar un cronograma con las tareas listas para ser realizadas.
- Establecer el responsable y la fecha de ejecución de las tareas.
- Medir el performance del planeamiento e identificar las causas de incumplimiento, a fin de aprender de los errores.

El método usado para adaptar las funciones al proyecto es el *pull planning*, cuya función es desarrollar un plan de trabajo con diferentes niveles de desglose de tareas y en diferentes etapas de la planificación.

Presuposiciones y Convenciones:

- El planeamiento es dinámico y se actualiza constantemente hasta finalizar el proyecto.
- El planeamiento debe involucrar a quienes supervisan y ejecutan el trabajo.
- Preparar compromisos públicamente incrementa el esfuerzo por cumplir lo prometido e incrementa la colaboración entre los involucrados.
- Una disposición esencial es la libertad de la partida para decir no a la ejecución de la tarea, debido a que presenta restricciones.
- Un planeamiento perfecto no es posible, pero es posible no cometer el mismo error dos veces.

- La variación en los sistemas de producción se reduce, pero no se elimina. Por ello, se requiere de buffers para absorber la variación.

Principios y Reglas:

- Mantener la planificación en lugares públicos durante la construcción del proyecto.
- No empezar tareas que no pueden o deben ser completadas. Solo se debe integrar tareas que han sido definidas, secuenciadas y dimensionadas.
- Remover las restricciones con aquellos que realizarán el trabajo y producir la planificación de tareas.
- Mantener una reserva de trabajo, buffer, para mitigar la variabilidad que se presentan en obra.

Estructuración del Sistema de Producción LPS: *SHOULD – CAN – WILL – DID*

Master Schedule - Planificación Maestra:

Se considera grandes hitos de control del proyecto. Asimismo, se establece la duración de cada hito y en base a ello, se estima la fecha de inicio, fecha de entrega y el presupuesto de la edificación. También, constituye las actividades que 'se debe' realizar y apoya al control global del avance del proyecto.

Phase Schedule – Planificación por fases:

Cada fase o hito identificado en el plan maestro se desglosa en proceso. Luego, se utiliza la herramienta *pull planning* para evaluar alternativas de sectorización de elementos verticales y horizontales, identificar, definir y secuenciar las tareas. Finalmente, el cronograma de cada fase se produce al asignar la duración de cada tarea y ordenar las tareas en el calendario (Ballard, 2016).

El propósito de la presente etapa es elaborar un plan para completar una fase de trabajo con las características siguientes (Ballard, 2007):

- Maximizar la generación del valor.
- Mejorar el entendimiento de todos los involucrados.
- Producir un plan base para el *lookahead planning* y *commitment planning*

Lookahead Planning – Planificación en el horizonte:

Se basa en la planificación de fases y brinda información para una programación a mediano plazo. Además, permite desglosar las tareas de manera detallada y afinar la secuencia del flujo de trabajo. Así como, busca anticiparse a los principales problemas que se generarían en la planificación semanal y realiza un análisis de restricciones. Al final, se obtiene las actividades que ‘se pueden’ hacer.

- a. Análisis de restricciones: En caso de subcontratar algunas partidas, es conveniente levantar las restricciones con los representantes de cada empresa subcontratista. Las personas que asisten a la reunión deben ser capaces de decidir y analizar, principalmente, la claridad del diseño de la tarea a ejecutar, la disposición de la mano de obra, equipo y material requerido, con el objetivo de identificar a tiempo restricciones que demora en removerse, por ejemplo, pedido de materiales importados, entre otros.

Tarea / Acero	Análisis de Restricciones				
	Diseño	Mano de obra	Equipo	Material	¿Se puede hacer?
Acero	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
Encofrado	Ok	No	Ok	No	No
IISS	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
IIEE	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
Concreto	Ok	No	Ok	No	No

Fig. 3.2.1.2 Análisis de restricciones en el Lookahead.

Fuente: Elaboración propia

- b. Desglose de tareas: Se detalla la estructura de trabajo de cada proceso en operaciones. Por ejemplo, la secuencia de operaciones para construir los elementos verticales es el siguiente: colocación de acero e instalaciones, encofrado, vaciado de concreto, desencofrado y curado. De la misma manera, se afina cada operación en pasos. Como ejemplo, los pasos para la operación de encofrado es el que sigue: acopio del encofrado, colocación de desmoldante, acarreo del material y colocación del encofrado.
- c. Diseño colaborativo de las operaciones: Se ordena los pasos detallados. Ello se realiza con el apoyo de un prototipo virtual, un prototipo físico o *First Run Studies*, que simula la ejecución de la operación.

En la presente etapa es importante el aporte de los últimos planificadores, pues gozan de experiencia en constructabilidad y evalúan la factibilidad de la operación.

Increasing workflow reliability – Incrementar la confiabilidad del flujo de trabajo:

Para mejorar la confiabilidad de la programación es necesario analizar la reunión semanal de programación, las herramientas visuales que se utiliza, la reunión diaria de planificación y seguir la ejecución de tareas en campo.

a. *Commitment Planning* – Planeamiento comprometido:

Deriva de la planificación intermedia o *lookahead* e involucra a los últimos planificadores de cada partida, con la finalidad de analizar las restricciones y comprometerse a ejecutar un conjunto de actividades. Para ello, la partida proveedor y la partida cliente deben acordar las condiciones de satisfacción.

El análisis de restricciones que se realiza en esta etapa es más detallado y es necesario la presencia del último planificador en campo, puesto que enriquece la reunión al informar las circunstancias reales que se viven en el proyecto.

Además, es necesario añadir herramientas que mejoran la visualización de las tareas durante la reunión. Así, se evita interpretaciones ambiguas que se obtienen a partir de planos 2D o cronogramas de Excel. En el punto 3.4 se detalla la importancia de herramientas visuales.

Un principio fundamental, según Ballard (2016), es aceptar un NO como una respuesta apropiada al requerimiento, pues para que alguno diga SI al requerimiento debe tener la habilidad de decir no. Ello involucra un cambio cultural en la mentalidad de las personas que requiere un entrenamiento tenaz y persuasivo para hacer el cambio y sostenerlo.

Análisis de Restricciones								
Tarea / Acero	Diseño	Mano de obra	Equipo	Material	Espacio	Seguridad	Trabajo pre requisito	¿Se puede hacer?
P5 S4 A	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
TP5 AL S1	Ok	No	Ok	No	Ok	Ok	Ok	No
TP5 AV S2	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
P6 S1 A	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
P6 S2 A	Ok	No	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	No
P6 S3A	Ok	Ok	Ok	No	Ok	Ok	Ok	No
P6 S4 A	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok

Fig. 3.2.1.3 Análisis de restricciones en *Commitment Planning*.
Fuente: Elaboración propia

b. *Daily Huddles* – Reuniones diarias:

Son reuniones breves entre el equipo técnico y los capataces, donde se informa el avance de las tareas prometidas. Generalmente, se congregan al inicio de la jornada laboral o al término de cada día. En el punto 3.4.1, se explica la necesidad de implementar modelos virtuales a estas reuniones.

Medición de Métricas:

Es necesario detallar indicadores para evaluar la eficiencia del LPS en el proyecto. Entre los cuales se presenta lo siguiente (Ballard, 2016):

- Porcentaje de Plan Completado:

Mide la confiabilidad del flujo de trabajo, es decir, el cumplimiento de las tareas prometidas entre los grupos de trabajo. Generalmente, se considera un periodo de una semana y se determina como la relación entre las tareas completadas y las tareas planeadas expresado en porcentaje.

El parámetro se calcula de la siguiente manera:

$$PPC = \frac{\#tareas\ realizadas\ (semana\ i)}{\#tareas\ planificadas\ (semana\ i)} * 100\%$$

- Frecuencia de las causas de no cumplimiento:

Sostiene la mejora continua. Dado que, permite identificar las principales causas de no cumplimiento que no han sido consideradas en la etapa de planificación y propone plantear medidas correctivas. Así, se evita incurrir dos veces en el mismo error, ya sea durante la ejecución del mismo proyecto o en otros proyectos.

Las categorías de causas de no cumplimiento se establecen al empezar el proyecto. En el punto 4.4.1.2.2 se detalla el catálogo considerado el proyecto de estudio.

Según la investigación realizada por Hamzeh y Aridi (2013), se añade los parámetros siguientes:

- *Task Made Ready*:

Mide la eficiencia del equipo para identificar y remover las restricciones a tiempo. La medición es similar al cálculo del PPC, con la diferencia de que se compara las tareas realizadas con las tareas planificadas una semana antes. Cuando el indicador alcanza el valor de 1, entonces se aumenta el nivel de dificultad y se compara con lo planificado hace dos semanas, tres semanas y así sucesivamente.

El parámetro se calcula de la siguiente manera:

$$TMR = \frac{\#tareas\ anticipadas\ (semana\ i)}{\#tareas\ prometidas\ (semana\ (i - k))}, k = 1, 2, \dots, n$$

- *Task Anticipated:*

Mide la habilidad de los planeadores para identificar todas las actividades involucradas en el proceso constructivo, es decir, evalúa la eficiencia del equipo para anticiparse a las tareas que sucederán en el proyecto, al cabo de algunas semanas. Es importante desarrollar esta capacidad, pues sin ello el trabajo necesario no identificado no puede ser preparado. De manera similar al TMR, cada vez que el indicador alcanza el valor de 0 se compara con lo programado hace dos, tres o n semanas. Además, el valor de TA varía en el rango de TA mínimo y TA máximo.

El parámetro se calcula de la siguiente manera:

$$TA = \frac{\#tareas\ planificadas\ (semana\ i) - \#tareas\ nuevas\ (semana\ i)}{\#tareas\ planificadas\ (semana\ (i - k))}, k = 0,1,2, \dots, n$$

$$TA\ mín = \frac{\#tareas\ anticipadas\ (semana\ i)}{\#tareas\ planificadas\ (semana\ (i - k))}, k = 0,1,2, \dots, n$$

$$TA\ máx = \frac{\#tareas\ anticipadas\ (semana\ i) + \#tareas\ anticipadas\ incompletas\ (semana\ i)}{\#tareas\ planificadas\ semana\ (i - k)}, k = 0,1,2..n$$

En resumen, se muestra la estructura del LPS:

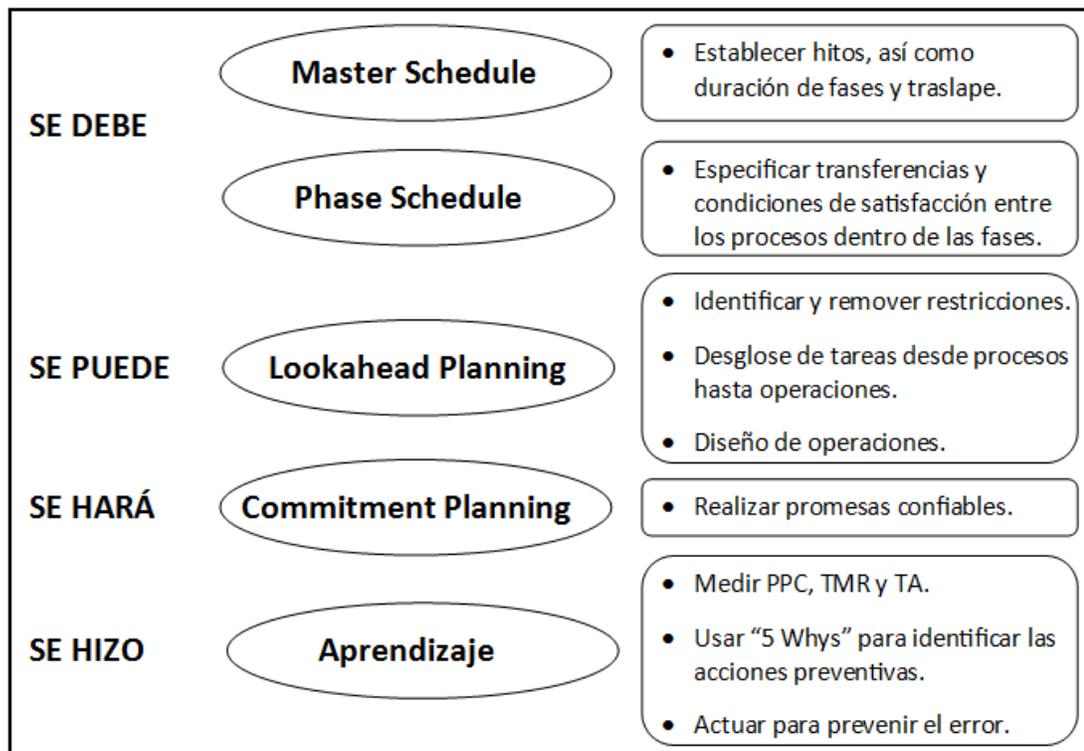


Fig. 3.2.1.4 Estructuración del Last Planner System.
Fuente: Adaptación de Ballard & Tommelein, 2016

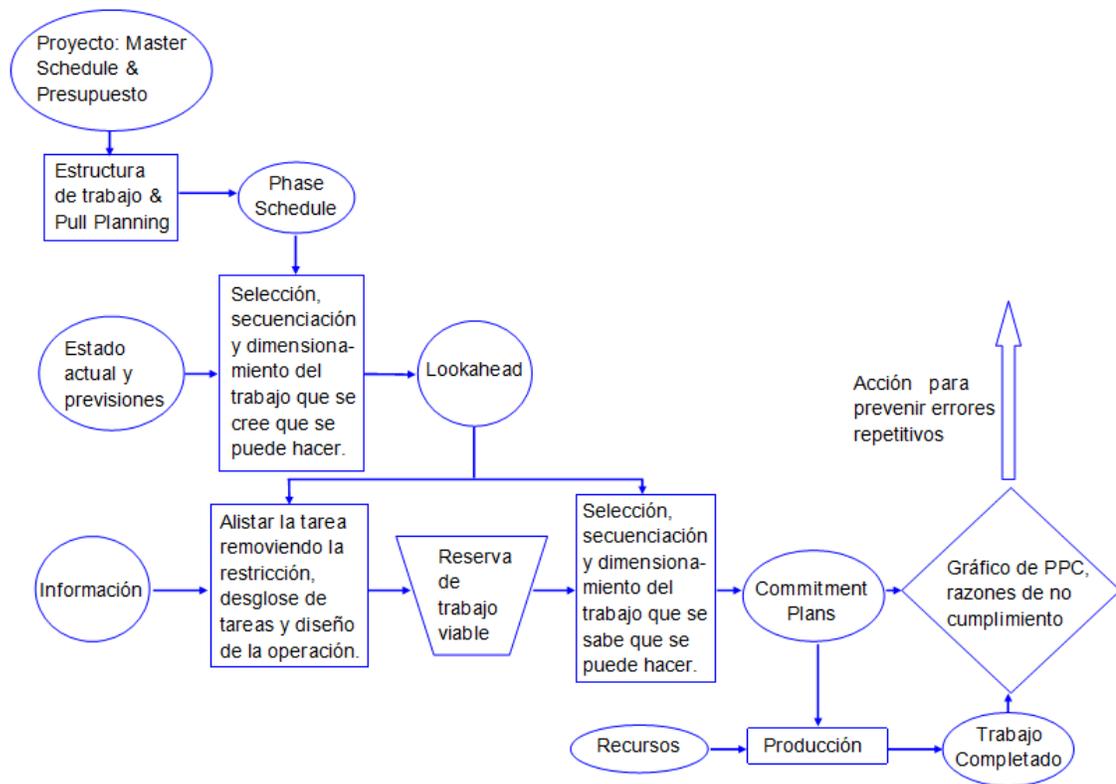


Fig.3.2.1.5 Relación entre los niveles de planeamiento en el Last Planner System.
Fuente: Adaptación de Ballard & Tommelein, 2016

3.2.2 Choosing By Advantages

La presente herramienta es un sistema de toma de decisiones basado en la comparación de ventajas que cada opción presenta, lo cual se utiliza para elegir la alternativa óptima (Arroyo et al. 2013).

El método CBA define los términos siguientes (Parrish, K; Tommelein, I, 2009):

Alternativa: Representa una posible elección. Por ejemplo, elegir entre sectorización 1, sectorización 2, ..., sectorización n.

Factor: Es un contenedor para el criterio, atributo, ventaja, importancia, y otros tipos de datos.

Criterio: Es una regla de decisión que es establecida por los responsables de tomar decisiones. Además, el criterio denomina como *must* para las características necesarias y *want* para las preferenciales.

Atributo: Es una característica, calidad o consecuencia de una alternativa.

Ventaja: Concierno al beneficio extra que diferencia a una alternativa de otra. Asimismo, la desventaja de una opción se considera como ventaja para la otra.

Importancia: El equipo responsable prioriza y escala, desde 0 hasta 100, las ventajas en cada factor. Luego, se comparan los atributos de cada factor que presentan una alta puntuación y se define la ventaja primordial. Finalmente, se pondera la puntuación de las demás ventajas respecto a la ventaja primordial.

Según Schottle et al. 2015, para la implementación del método CBA se presenta los pasos siguientes:

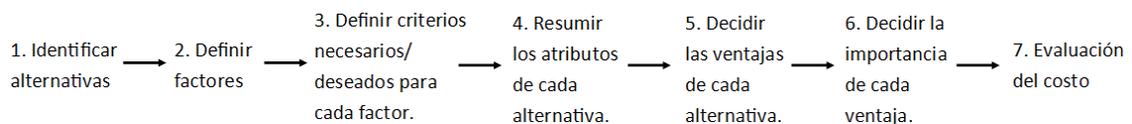


Fig. 3.2.2.1 Pasos del método CBA.
Fuente: Adaptación de Schottle et al. 2015

A continuación, se describen los pasos para la evaluación de sectorizaciones o secuencias constructivas que se propone en la investigación desarrollada por Murguía y Brioso (2017):

- Paso 1: Los involucrados definen las alternativas de secuencias de construcción.
- Paso 2: Se determina los factores que diferencian a las opciones, tales como estandarización, flujos de trabajo, logística, entre otros.
- Paso 3: Los responsables definen si el criterio es preferencial o necesario para cada factor. Por ejemplo, un criterio deseado es a mayor similitud del metrado de encofrado en elementos verticales, mejor.
- Paso 4: Se identifica los atributos de cada alternativa. Por ejemplo, la variación del metrado de cada sector respecto al promedio, las interferencias entre sectores consecutivos, entre otros.
- Paso 5: Se detalla las ventajas de una opción sobre la otra. Por ejemplo, si una secuencia presenta 2 conflictos entre sectores consecutivos y otra solo 1, entonces la última presenta la ventaja de un conflicto menos respecto a la primera.

Paso 6: Los participantes deciden la jerarquía de cada ventaja, se determina la ventaja primordial y se escala la importancia de los atributos restantes.

Por ejemplo, en la investigación, se eligió el atributo de interferencias entre sectores consecutivos como ventaja primordial, y, de acuerdo a ello, se valoró los atributos restantes.

Paso 7: Se evalúa el costo de la alternativa y se analiza si se encuentra dentro del rango permitido.

3.3 Sinergia LEAN - BIM

Lean Construction y *Building Information Modeling* son diferentes iniciativas que influyen en la industria de la construcción. La literatura existente indica que es posible aplicar ambas herramientas de manera independiente.

Según el análisis desarrollado por Rafael Sacks y Lauri Koskela, existe una sinergia entre ambos sistemas. Para ello, se usan matrices de yuxtaposición entre las funcionalidades de BIM y los principios de Lean. Hasta el momento se han identificado 56 interacciones, cuya validación está abierta a posteriores estudios de investigación.

Entre los principios Lean que presentan una mayor cantidad de interacciones, se encuentra lo siguiente:

- La reducción de la variabilidad del producto.
- La reducción de la variabilidad del proceso.
- Reduce la duración del ciclo de producción.

Del mismo modo, entre las principales funcionalidades de BIM, se describe lo siguiente:

- Evaluación estética y funcional a través de la visualización.
- Múltiples usuarios observan de manera conjunta o separada los modelos elaborados por cada especialidad.
- Visualización de la programación del proyecto a través de un modelo 4D.
- Comunicación vía internet acerca de la información del producto o proceso.

Entre las principales interacciones, se dispone de lo siguiente (Sacks et al. 2009):

- Debido a la buena apreciación del diseño al inicio de la etapa de diseño, se evalúa los requerimientos deseados por el cliente, tales como energía, acústica, térmico, entre otros.

Además, la calidad del producto final es más consistente con el diseño realizado y reduce la variabilidad que comúnmente se introduce en la etapa de construcción.

- El modelo con información virtual impone un mayor grado de rigurosidad en la elaboración del diseño del producto, ya que exige un detallado completo de cada elemento del proyecto. En consecuencia, se reduce la cantidad de trabajos rehechos en campo.
- Los modelos virtuales incrementan la complejidad en la elaboración de los proyectos, pues es complicado contar con profesionales que conciban una idea clara del proyecto en base a planos 2D. Asimismo, simplifica la tarea de entendimiento para los constructores y últimos planificadores.
- La revisión multidisciplinaria del diseño y la ingeniería de detalle, permite identificar, de manera temprana, los errores de diseño y resolver las incompatibilidades entre las especialidades.
- La entrega directa de información evita esperas y mejora el flujo comunicación entre los especialistas y/o involucrados en el proyecto.
- La secuencia de instalación simulada en un modelo 4D guía a los trabajadores en cómo realizar un trabajo en contextos específicos, así como identifica procedimientos a estandarizar.
- La generación automática de tareas evita omitir tareas en las diferentes etapas de trabajo.
- La automática cuantificación de materiales y metrados ayuda en la planificación y evita errores humanos de conteo.

3.3.1 Integración del modelo virtual BIM con el *Last Planner System*

Durante la etapa de ejecución del proyecto, el modelo con información virtual se integra al *Last Planner System*. Este último, provee un estable flujo de trabajo y reduce la incertidumbre inherente que existe en el proceso de construcción.

A continuación, se presenta el resumen de dos investigaciones que fueron realizadas con anterioridad al presente trabajo.

- *Integration Framework of BIM with the Last Planner System™*:

Fue realizado por Bhatla y Leite (2012) y sostiene que la fiabilidad de la programación se incrementa al ser apoyado por un modelo 4D, dado que describe el proceso del proyecto en una línea de tiempo.

Además, el modelo propone alternativas en el diseño del proceso constructivo, de modo que mejore el flujo de trabajo. Asimismo, permite el adecuado planteamiento del lookahead, ya que previamente la metodología BIM ha coordinado con las demás especialidades para evitar interferencias y reportes de consultas.

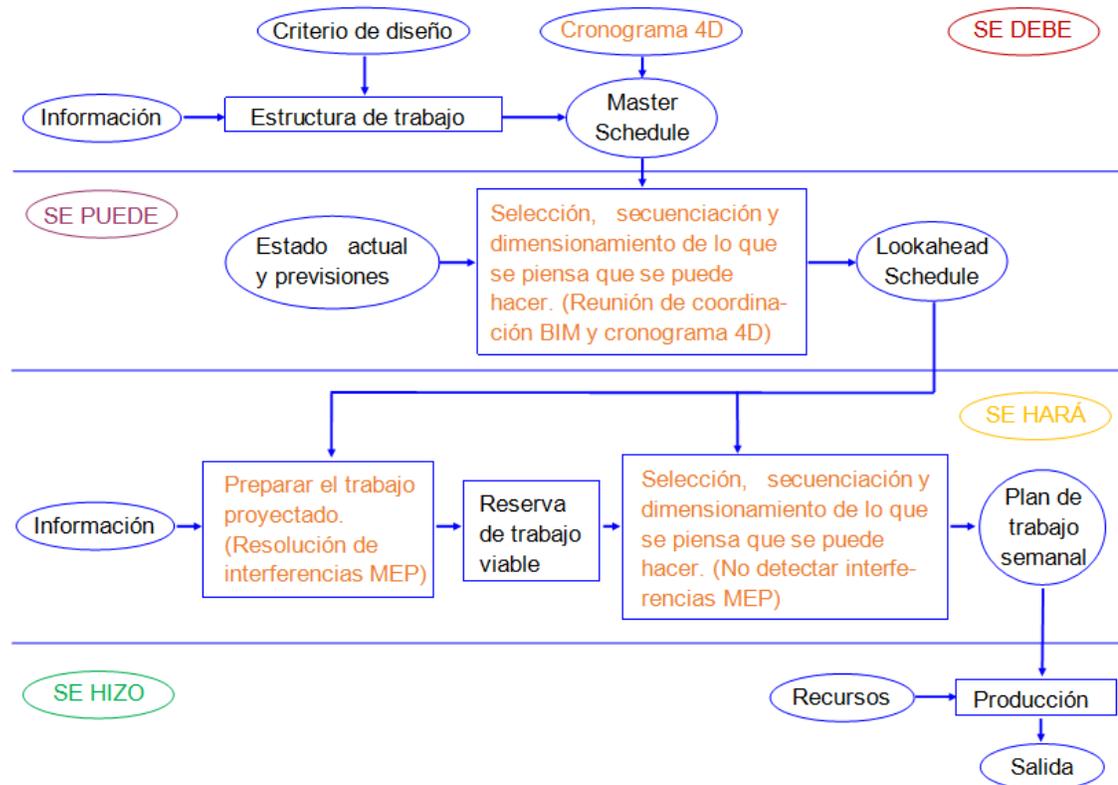


Fig. 3.3.1.1 Integración de BIM con LPS.
Fuente: Adaptación de Bhatla & Leite, 2012

- *Gestión visual del Sistema Last Planner mediante el modelado BIM:*

La investigación fue realizada por Orihuela et al. (2015), y describen la integración entre el modelo virtual BIM con las diferentes etapas del LPS.

En primer lugar, relaciona el plan maestro con el modelo 3D con elementos genéricos. Luego, detalla el nivel de despiece del modelo, la importancia de modelar elementos auxiliares y define los parámetros a incluir.

En segundo lugar, relaciona el planeamiento de fases con el modelo 3D con metrados, donde considera que el modelo genera alternativas de sectorización para las partidas de encofrado y concreto, para evaluar la secuencia adecuada de producción.

En tercer lugar, relaciona el lookahead con el modelo 4D. Allí, añade fecha de ejecución para las actividades y simula la construcción. Ello facilita la comprensión de las tareas.

En cuarto lugar, relaciona la programación semanal con el modelo 4D para la semana, en el cual distribuye visualmente las tareas y comunica a los trabajadores mediante imágenes impresas a colores, pues el cambio de color del elemento indica el ingreso de otra partida.

Finalmente, relaciona la retroalimentación virtual contra el real, el cual incluye el modelo junto a imágenes reales del proyecto, con el objetivo de identificar causas de no cumplimiento y plantear acciones correctivas.



Fig. 3.3.1.2 Integración del modelo virtual BIM con LPS.
Fuente: Orihuela et al. 2015

Ambas investigaciones serán la base para el modelo de integración a desarrollar en la presente investigación.

3.3.2 Casos de estudio que integra la sinergia LEAN – BIM

Caso de estudio 1. (Dang, 2012)

El caso de estudio utilizó herramientas 3D y 4D de *Virtual Design and Construction* en las diferentes fases del proyecto. El modelo 3D se utilizó en la coordinación entre las especialidades de instalaciones eléctricas, sanitarias y mecánicas, así como para la identificación y resolución de conflictos. Asimismo, el modelo 4D se utilizó para gestionar el proceso de actividades junto al *Last Planner System*.

Entre los principales beneficios alcanzados en el proyecto, se obtuvo lo siguiente:

- Debido al uso de herramientas VDC en la prefabricación de sistemas durante la coordinación entre las especialidad eléctrica, sanitaria y mecánica. Se incrementó la productividad de 20 a 33%.
- No se identificó conflictos entre los sistemas modelados y coordinados.
- Solo 43 horas de trabajo de un total de 25000 horas de trabajo.
- Se formuló 6 *Request For Information* que involucran a sistemas que no fueron modelados ni coordinados.
- Se incrementó la confiabilidad de la planificación, dado que se obtuvo un porcentaje de plan acumulado de 83%.

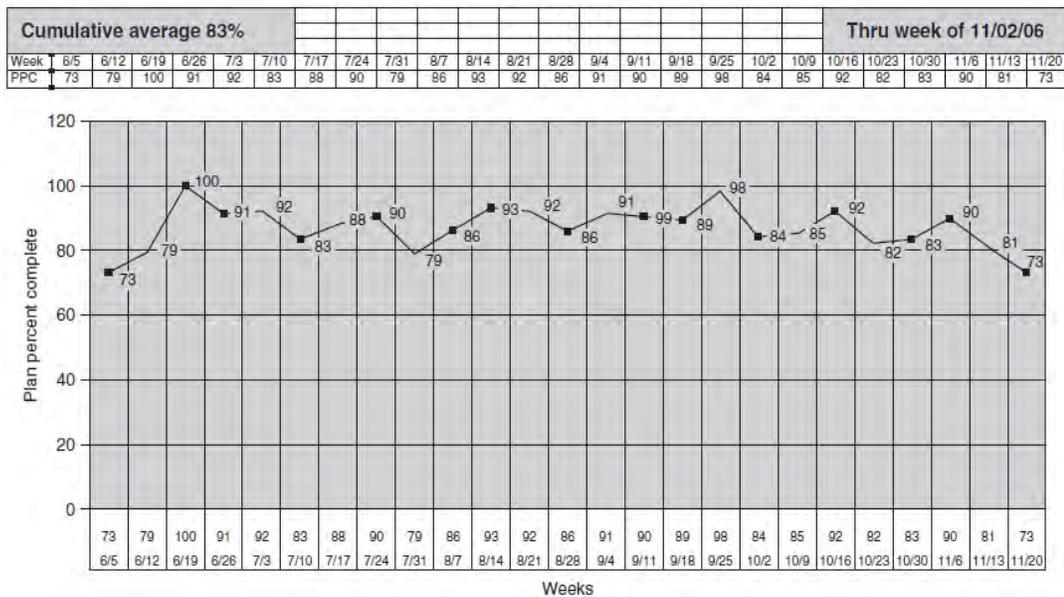


Fig. 3.3.2.1 Porcentaje de plan completado - Caso 1.
Fuente: (Dang, 2012)

Caso de estudio 2. (Khan & Tzortzopoulos, 2014)

El caso de estudio se desarrolló durante la fase de diseño de dos proyectos.

El primer proyecto consistió en diseñar un hotel de siete pisos, que iba a ser desarrollada con la metodología tradicional *Design Bid Build*. El presupuesto fue de \$23.9 millones de dólares y fue ejecutado por la firma AE que se ubica en Melbourne, Florida.

La investigación duró 16 semanas y el equipo de diseño reunió a un BIM manager, un arquitecto, un ingeniero estructural, un ingeniero sanitario, un ingeniero eléctrico, un ingeniero mecánico y seis técnicos BIM.

Durante la etapa de diseño, se obtuvo un porcentaje de plan completado superior a 80%

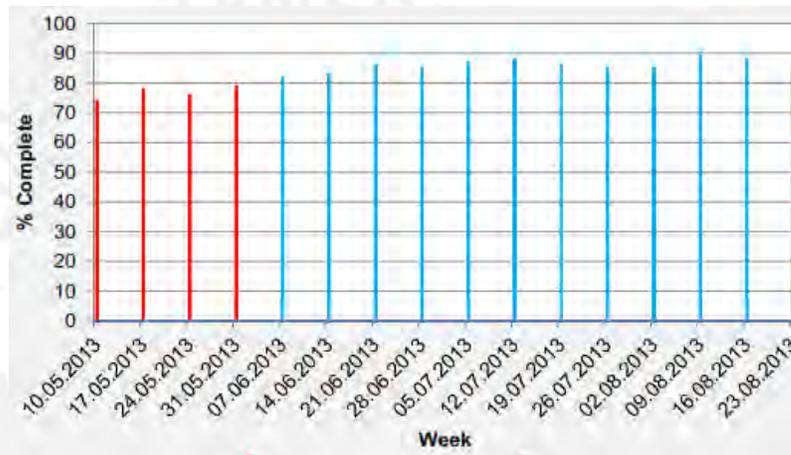


Fig. 3.3.2.2 Porcentaje de plan completado - Caso 2a.
Fuente: (Khan & Tzortzopoulos, 2014)

El segundo proyecto consistió en diseñar un proyecto de apartamento de seis pisos que iba a ser desarrollada con la metodología tradicional *Design Bid Build*. El presupuesto fue de \$13.6 millones de dólares y fue realizado por la firma AE que se ubica en Fort Pierce, Florida.

El estudio duró 16 semanas y el equipo de diseño integró a un BIM manager, un arquitecto, un ingeniero estructural, un arquitecto interno, un ingeniero sanitario, un ingeniero eléctrico, un ingeniero mecánico y cinco técnicos BIM.

Durante la etapa de diseño, igual que el proyecto 1, se obtuvo un porcentaje de plan completado superior a 80%.

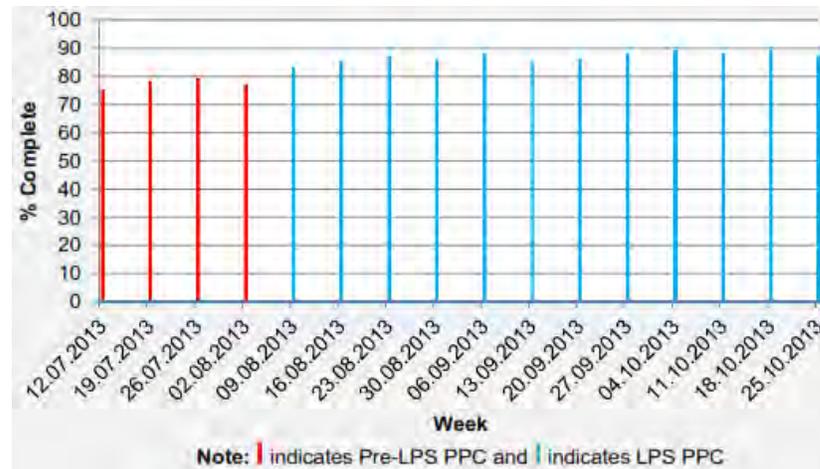


Fig. 3.3.2.3 Porcentaje de plan completado - Caso 2b.
Fuente: (Khan & Tzortzopoulos, 2014)

3.4 Visual Management

Constantemente, las personas reciben información del entorno. La mayoría es de productos tecnológicos e innovadores que facilitan la comprensión de la información. Ello, se aplica en las organizaciones de manufactura y servicio, que son cuidadosos al emplear herramientas visuales simples, el cual permite que la información sea necesaria, correcta y entendible para que las personas lo usen en las transacciones diarias de trabajo (Tezel et al. 2009).

En el ámbito *Lean*, *Visual Management* permite comunicar un mensaje o instrucción de manera clara y rápida. Asimismo, se usa en cualquier parte de una organización donde existe la probabilidad de que una información se interprete de manera ambigua (O'Connor & Swain, 2013). Por ello, su aplicación es necesaria en la industria de la construcción que aún utiliza planos 2D como medio de comunicación.

Beneficios:

El uso adecuado de esta herramienta permite un alto performance en el proyecto, ya que el proceso de comunicación es efectivo. Entre los principales beneficios se presenta lo siguiente (O'Connor & Swain, 2013):

- Mejora la calidad y la productividad.
- Sostiene el trabajo colaborativo.
- Ayuda a definir organización y operación del sitio.
- Mejora la seguridad y eficiencia del trabajo.

Funciones de *Visual Management* (Tezel et al. 2009):

- Transparencia:

Informa el flujo de producción de manera clara. Ello motiva a los trabajadores a participar, tomar decisiones y mejorar la planificación, pues el entendimiento del trabajo a realizar no depende del grado de conocimiento, sino de su experiencia práctica.

- Disciplina:

Mantiene el orden en la secuencia de procesos. Asimismo, ayuda a evaluar y a seguir los procedimientos constructivos correctos. Además, ayuda a enseñar y controlar al personal acerca de la óptima distribución de los materiales, herramientas, equipos durante el proceso de ejecución del proyecto.

- Mejora continua:

La transparencia y la disciplina soportan la mejora del flujo de producción, pues la gestión visual involucra a todos los integrantes del proyecto, con la finalidad de plantear soluciones al problema identificado.

- Facilitación del trabajo:

Las herramientas visuales facilitan la comprensión del trabajo a realizar, pues los trabajadores evitan realizar esquemas mentales que resultan complejos. Además, la representación visual es homogénea para todas las personas, así evita diferentes interpretaciones. En el punto 3.4.1, se detalla la herramienta *Virtual Huddle*.

- Entrenamiento en el trabajo:

Enriquece la experiencia de la persona, pues al plantear soluciones para la mejora continua o al analizar la constructabilidad de elementos estructurales se intercambia experiencias y se alimenta el conocimiento de todos los participantes del proyecto. Puesto que, el conocimiento tácito de cada persona es explícito para los demás mediante el uso de herramientas visuales.

- Unificación:

Las herramientas visuales unen a personas con distintas capacidades, con el objetivo de plantear y analizar diferentes alternativas de trabajo para elegir la óptima. La reunión se enriquece con el conocimiento técnico-práctico del personal obrero y el conocimiento crítico del profesional.

3.4.1 *Virtual Huddle*

Indica realizar reuniones breves diarias, denominada *Daily Huddle*, para distribuir el trabajo a las diferentes partidas; sin embargo, una limitación es la comunicación basada en planos 2D y explicaciones verbales informales. En la investigación realizada por Mourgues et al. (2007), se propone el método *Virtual Huddle*, el cual consiste en asistir mediante modelos virtuales 3D y 4D a la reunión.

Los requisitos que considera Mourgues es el acceso a internet, una pizarra inteligente, un proyector y laptops. No obstante, en el ámbito peruano, se puede prescindir de la pizarra inteligente y del acceso a internet.

Asimismo, la reunión involucra al equipo técnico y a los últimos constructores. Ello mejora el flujo de comunicación, dado que elimina a los intermediarios. Además, la pregunta o aporte del trabajador y la explicación de los profesionales genera un ambiente dinámico. Sin embargo, para el adecuado funcionamiento de la herramienta, es necesario mantener actualizado el modelo, lo cual constituye un desafío para el modelador.

En la investigación del *Virtual Huddle*, se concluye lo siguiente:

- Requiere un personal que sea capaz de crear y actualizar el modelo.
- Mejora la comunicación entre el equipo técnico y los trabajadores.
- Motiva la participación de los trabajadores.
- Implementa las diversas habilidades de los trabajadores para desarrollar una tarea.

CAPÍTULO 4: DESARROLLO DEL MARCO CONCEPTUAL

El presente modelo de integración considera la investigación realizada por Bhatla y Leite (2012) y Orihuela, Canchaya y Rodríguez (2015), que fueron descritas en el punto 3.3.1, asimismo utiliza la estructura del LPS desarrollado por Ballard y Tommelein (2016).

4.1 Modelo de integración *Last Planner System* y BIM

Consta de 6 etapas y cada etapa vincula una etapa del Last Planner System, el aporte del modelo virtual BIM 3D&4D, los elementos auxiliares pertinentes y el nivel de desarrollo de cada elemento.

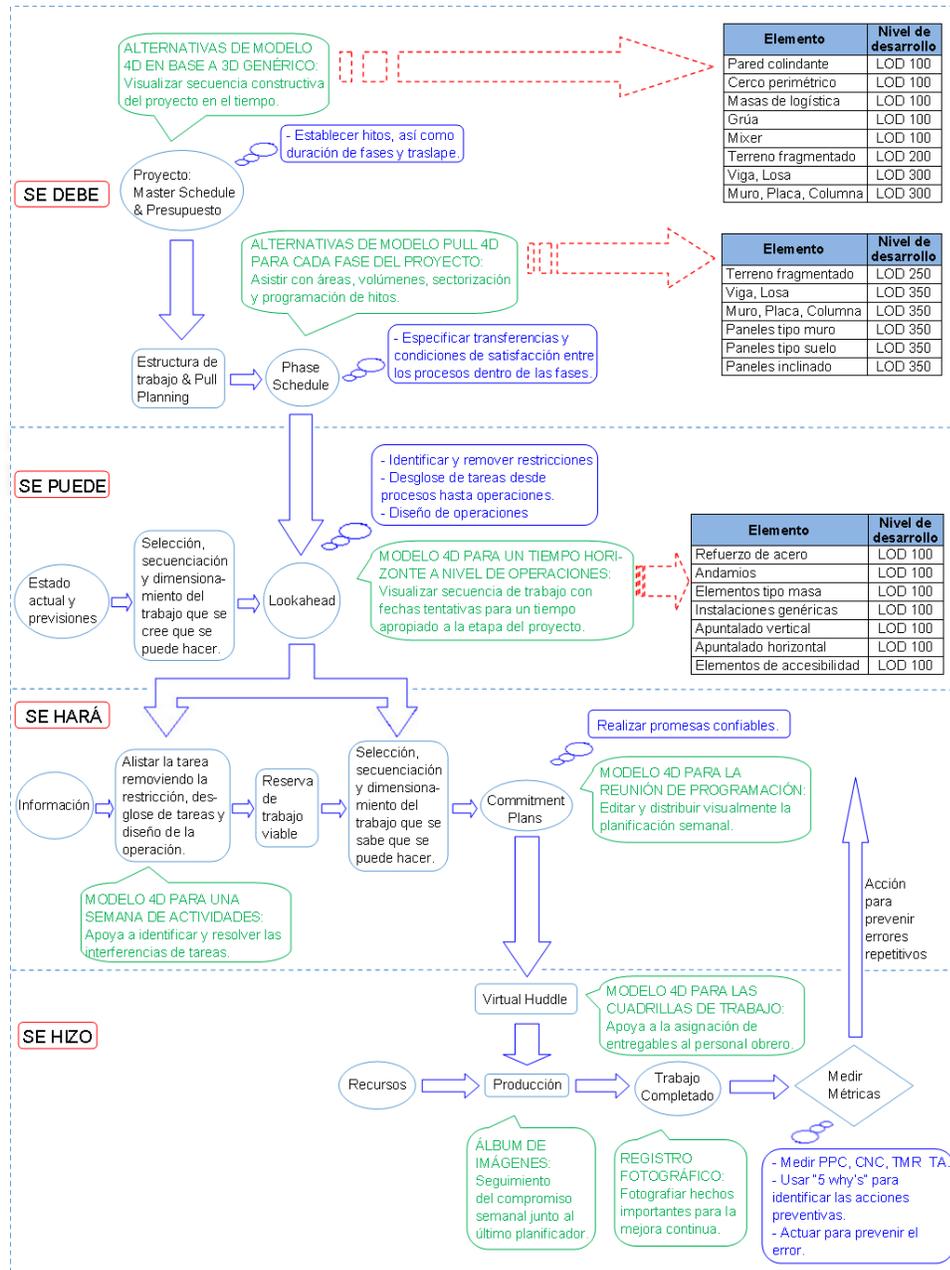


Fig. 4.1.1 Integración los modelos virtuales BIM con LPS.
Fuente: Adaptado de Ballard & Tommelein, 2016 y Orihuela et al. 2015

4.1.1 Master Schedule – Alternativas de Modelo 4D en base a 3D Genérico

En la presente etapa, el modelo 3D requiere algunos criterios mínimos de modelado. Por ello, en la especialidad de estructuras, es necesario considerar lo siguiente:

- Los elementos verticales tales como muro, placa o columna deben ser modelados hasta el fondo de viga o hasta el fondo de losa.
- Los elementos verticales deben ser modelados en la familia tipo muro básico, pues facilita la inserción de refuerzo estructural que se incluirá en el *lookahead*.
- Los elementos horizontales tales como viga, losa maciza, aligerada o prelosa deben ser divididas en el tercio de cada paño, excepto los proyectos de área reducida que admiten dos sectores, en el cual se divide los elementos centrales.
- Los elementos deben contener los parámetros básicos siguientes: Nivel de Elemento; Tipo de Elemento; y Sector. De modo que, facilite la elaboración del modelo 4D genérico.

Además, para mejorar la visualización de la construcción del proyecto, el modelo 3D puede incorporar los elementos auxiliares descritos a continuación:

Tabla. 4.1.1.1 Elementos auxiliares y estructurales en el *master schedule*.

Elemento	Nivel de desarrollo
Pared colindante	LOD 100
Cerco perimétrico	LOD 100
Masas de logística	LOD 100
Grúa	LOD 100
Mixer	LOD 100
Terreno fragmentado	LOD 200
Viga, Losa	LOD 300
Muro, Placa, Columna	LOD 300

- Paredes de edificaciones colindantes con el proyecto:

Permite evaluar el sistema de encofrado a utilizar, es decir, analiza el uso de encofrado a dos caras o encofrado a una cara y tecnopor en la otra cara. Asimismo, ayuda a identificar medidas de seguridad para evitar daños a los vecinos.

- Cerco perimétrico:

En proyectos de área reducida permite visualizar el espacio disponible para la ubicación de materiales. Asimismo, es importante ubicar las puertas de ingreso y salida para el adecuado flujo de maquinarias.

- Masas de logística:

Permite distribuir los materiales tales como cemento, grava, herramientas manuales, entre otros, sobre el espacio disponible.

- Torre grúa:

En base a varias alternativas, permite establecer el lugar óptimo de la torre grúa, a fin de reducir el tiempo de traslado de los materiales.

- Mixer / Medios de transporte:

La ubicación del mixer ayuda a definir el sistema de vaciado a usar, es decir, emplear tuberías de impulsión o bomba estacionaria. Así como, los medios de transporte permiten evaluar la accesibilidad y ubicación, con el objetivo de evitar interferencias entre los proveedores de materiales.

El nivel de desarrollo para la pared colindante, el cerco perimétrico, masa logística, la torre grúa y los medios de transporte es *LOD 100*, ya que brinda información de ubicación.

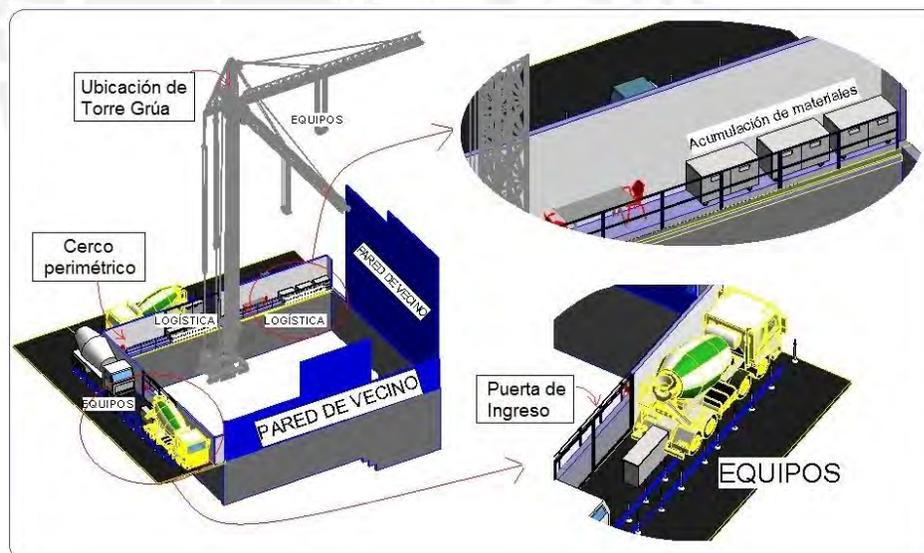


Fig. 4.1.1.1 Modelado de elementos auxiliares.
Fuente: Elaboración propia

- Terreno fragmentado:

En la etapa de cimentaciones, se recomienda modelar el terreno a excavar en cubos de 1 o 4 m³ para generar secuencias de excavación y la ubicación de la rampa.

El nivel de desarrollo del elemento es *LOD 200*, pues brinda información de metrado y ubicación. (Ver Fig. 4.1.1.2)

- Elementos estructurales horizontales y verticales:

En base a los metrados, se evalúa la secuencia constructiva del casco estructural y equilibra la carga de trabajo de la partida de concreto. (Ver Fig. 4.1.1.3)

El nivel de desarrollo de los elementos es *LOD 300*, puesto que ofrece información de ubicación, metrado exacto de concreto y metrado aproximado de encofrado.

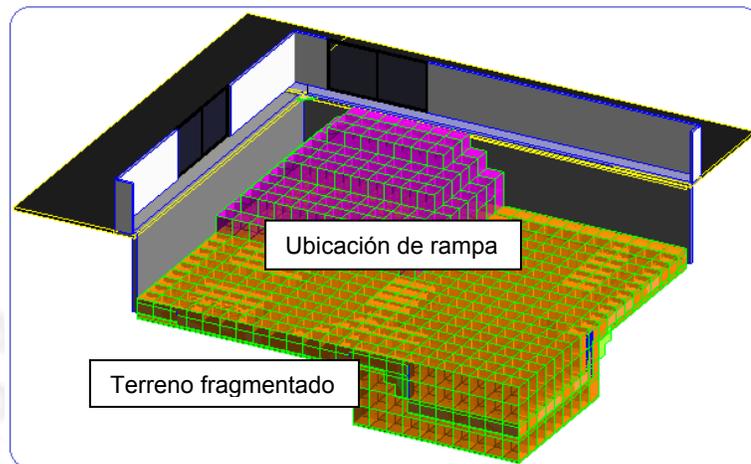


Fig. 4.1.1.2 Modelo de terreno fragmentado para excavación.
Fuente: Elaboración propia

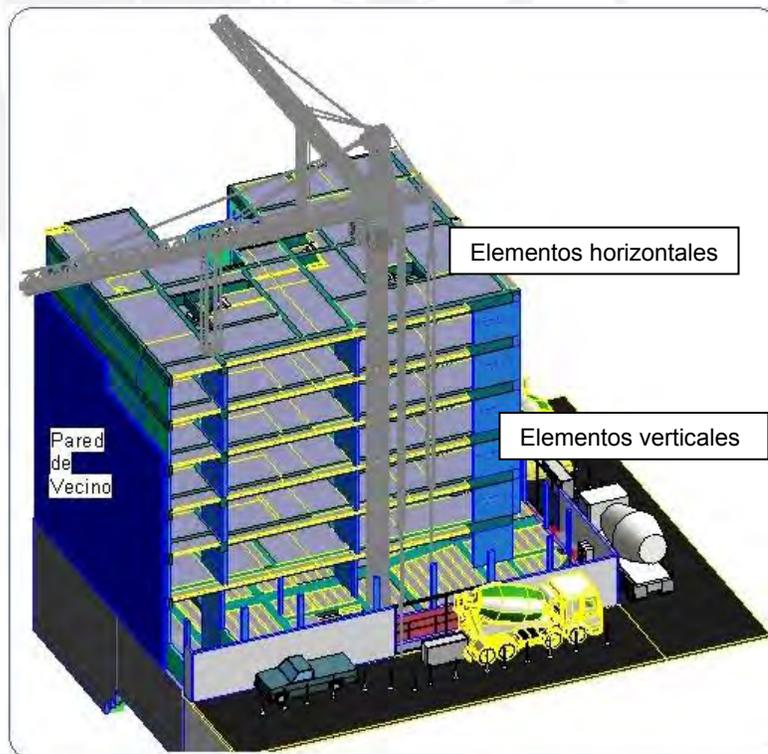


Fig. 4.1.1.3 Modelo de estructuras y elementos auxiliares.
Fuente: Elaboración propia

El modelo 4D genérico permite ver el avance del proyecto en la línea de tiempo, a nivel de hitos, es decir, fases de calzadura, excavación, cimentaciones, superestructura, acabados, entre otros. De modo que, permite generar alternativas 4D para analizar la secuencia constructiva, identificar problemas potenciales y plantear alternativas de solución. Luego, mediante el uso de la herramienta *Choosing by Advantages*, se escoge el modelo óptimo y se elabora el plan maestro.

4.1.2 Phase Scheduling – Alternativas de Modelo Pull 4D para cada Fase

En esta fase, el modelo 3D puede incluir los elementos auxiliares siguientes:

Tabla. 4.1.2.1 Elementos auxiliares y estructurales en el *phase schedule*.

Elemento	Nivel de desarrollo
Terreno fragmentado	LOD 250
Viga, Losa	LOD 350
Muro, Placa, Columna	LOD 350
Paneles tipo muro	LOD 350
Paneles tipo suelo	LOD 350
Paneles inclinado	LOD 350

- Paneles de encofrado horizontal, vertical e inclinado:

Genera metrados para desarrollar alternativas de sectorizaciones en la partida de encofrado de elementos verticales y horizontales.

El nivel de desarrollo de los elementos es *LOD 350*, puesto que ofrecen información de ubicación y metrado exacto de encofrado.

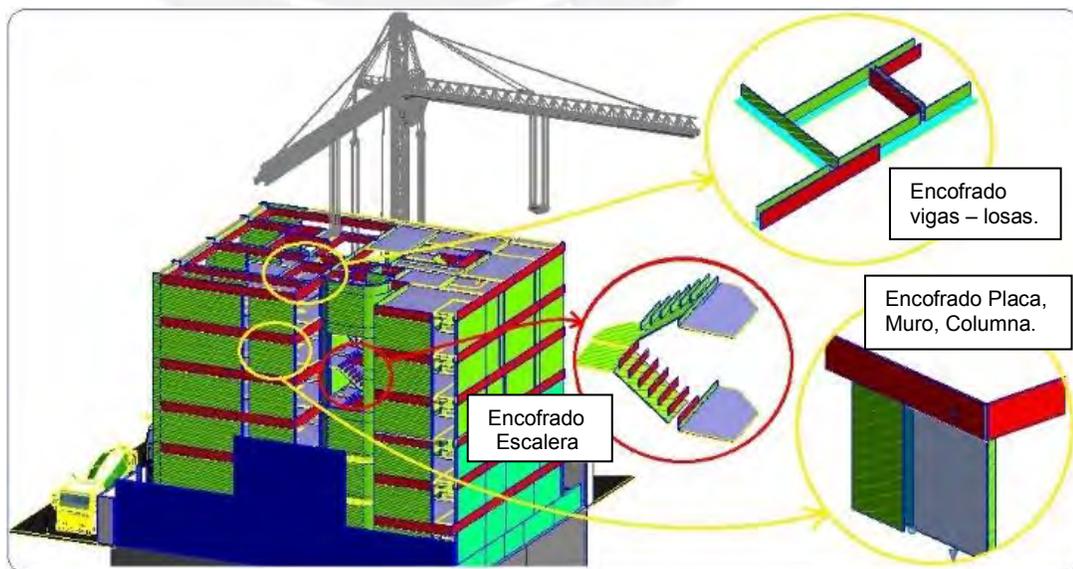


Fig. 4.1.2.1. Modelo de paneles de encofrado.
Fuente: Elaboración propia

Asimismo, se requiere mejorar el nivel de desarrollo de los elementos siguientes:

- Terreno fragmentado:

Permite generar varias alternativas de excavación, a fin de elegir la secuencia óptima.

El nivel de desarrollo del elemento es *LOD 250*, ya que ofrece información de ubicación, metrado aproximado y secuencia constructiva.

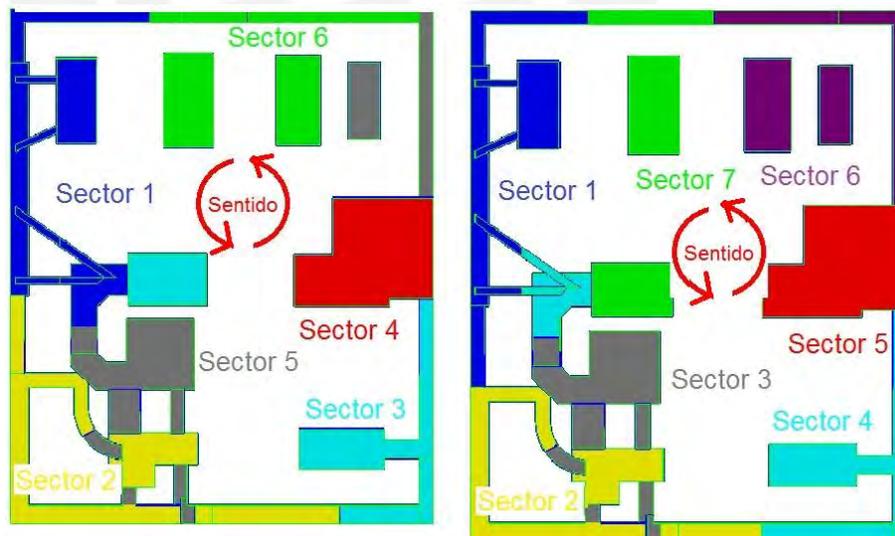
- Elementos horizontales y verticales:

Permite analizar la constructabilidad y desarrollar diferentes tipos de sectorizaciones.

El nivel de desarrollo de los elementos es *LOD 350*, pues brinda información de metrado, ubicación y orden de construcción. Si el proyecto emplea el sistema de losa prefabricada, el modelo debe separar la prelosa del conjunto de la losa, así desempeña el papel de encofrado y su área es igual al área de apuntalado. En base a ello, se dimensiona la carga de trabajo y el personal necesario.

El modelo 4D presenta alternativas en la secuencia de construcción de los procesos, es decir, la secuencia de elementos de cimentación, elementos verticales y horizontales. Luego, mediante el uso de la herramienta CBA, se selecciona el óptimo y se elabora cronograma de cada fase.

A continuación, se presenta varias alternativas de vaciado de concreto en la cimentación.



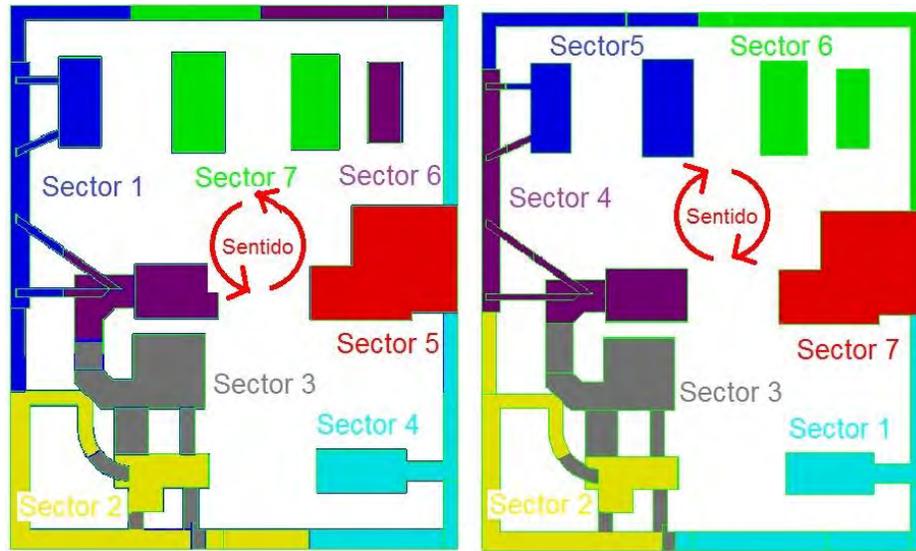


Fig. 4.1.2.2 Alternativas de sectorización para la cimentación.
Fuente: Elaboración propia

4.1.3 Lookahead Planning – Modelo 4D para un tiempo horizonte a nivel de operaciones

En esta etapa, el modelo 3D puede incluir los elementos auxiliares descritos a continuación:

Tabla. 4.1.3.1 Elementos auxiliares y estructurales en el *lookahead planning*.

Elemento	Nivel de desarrollo
Refuerzo de acero	LOD 100
Andamios	LOD 100
Elementos tipo masa	LOD 100
Instalaciones genéricas	LOD 100
Apuntalado vertical	LOD 100
Apuntalado horizontal	LOD 100
Elementos de accesibilidad	LOD 100

- Apuntalado de elementos verticales y horizontales:

Permite identificar y resolver los posibles conflictos de tareas o congestión de personas en un espacio.

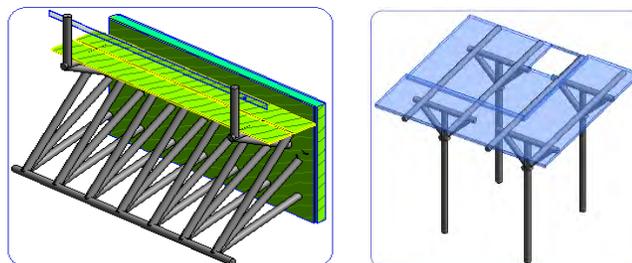


Fig. 4.1.3.1 Apuntalado de elementos verticales y horizontales.
Fuente: Elaboración propia

- Refuerzo estructural de acero en elementos verticales y horizontales:

Permite visualizar la partida de acero en el modelo 4D y por ende, en la reunión de programación. Asimismo, indica el espacio que ocupará la colocación del acero, de tal manera que no interfiera con otra tarea.

Si el proyecto trabaja con el sistema de acero pre-dimensionado, es necesario analizar el espacio para la acumulación de dicho material. Dado que, en proyectos de área pequeña, el proveedor envía el acero de los elementos verticales y horizontales de manera conjunta. Situación distinta ocurre en un proyecto con suficiente espacio de almacenamiento.

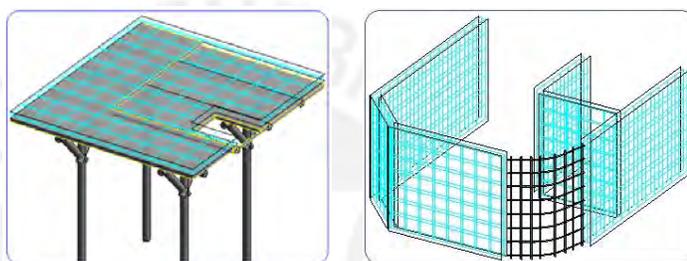


Fig. 4.1.3.2 Colocación de acero en elementos verticales y horizontales.
Fuente: Elaboración propia

- Andamios y elementos de accesibilidad:

Los andamios permiten identificar el área ocupada. Así como, los elementos de accesibilidad facilitan el análisis de la ubicación propicia para evitar cambios frecuentes.

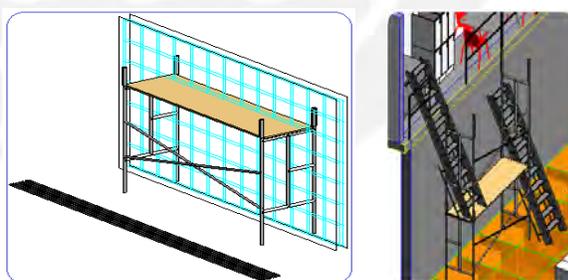


Fig. 4.1.3.3 Distribución de andamios y elementos de accesibilidad.
Fuente: Elaboración propia

- Masas de acopio de acero, encofrado y tuberías:

Permite distribuir los materiales de logística en el espacio adecuado. Así, se prioriza la actividad de acumulación temporal de materiales, pues habitualmente no se planifica y se ejecuta según la intuición del personal y/o equipo técnico.

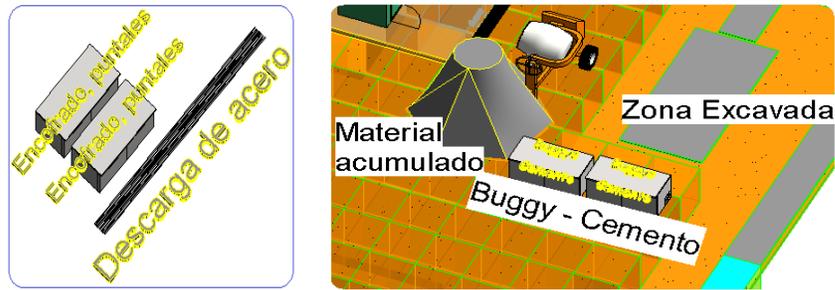


Fig. 4.1.3.4 Distribución de masas de acopio.
Fuente: Elaboración propia

- Elementos genéricos de instalaciones:

En caso de que no se realizó el modelo de la especialidad de instalaciones, se puede implementar elementos genéricos que representen dichas partidas. De modo que, los capataces de instalaciones puedan visualizar el desarrollo de su trabajo y evaluar si interfiere con alguna partida y/o presenta alguna restricción no contemplada.

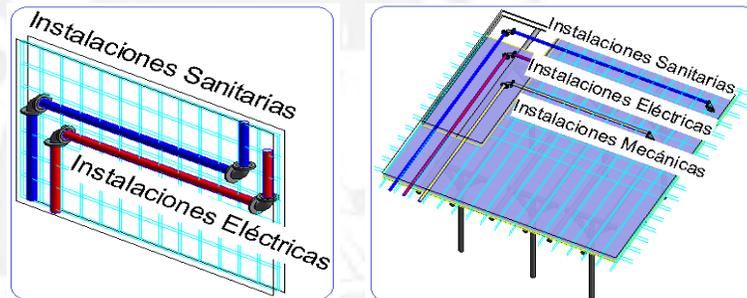


Fig. 4.1.3.5 Ubicación de los elementos de instalaciones.
Fuente: Elaboración propia

El nivel de desarrollo de los elementos presentados es *LOD 100*, ya que brinda información de ubicación.

Luego de implementar los elementos auxiliares a nivel de operaciones, el modelo 4D detallado enriquece la reunión de planificación, puesto que los últimos planificadores colaboran en la detección y solución de interferencias de proceso y optimizan las condiciones en obra, tales como accesibilidad al área de trabajo, transporte de materiales, zona de descarga, entre otros. Por ejemplo, se puede planificar la colocación de acero en elementos horizontales, el cual requiere andamios para su instalación; sin embargo, dicho trabajo no es factible porque la zona de trabajo se encuentra apuntalada. Por lo tanto, el acero se coloca luego de que se haya retirado los puntales.

A continuación, se muestra una zona congestionada que dificulta la instalación de equipos necesarios, como el andamio, para la realización de la tarea programada.

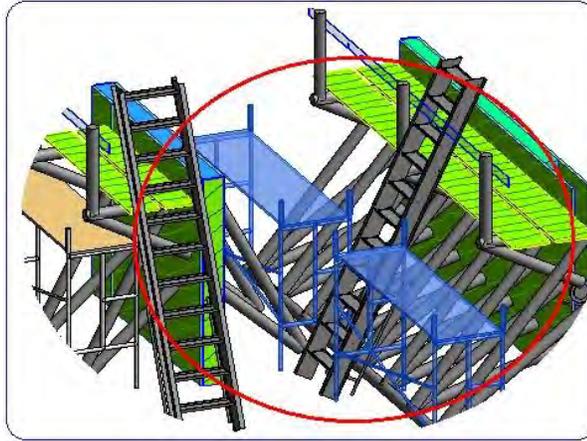


Fig. 4.1.3.6 Congestión de elementos.
Fuente: Elaboración propia

Asimismo, debido a que el modelo 4D presenta la secuencia definida de tareas y el metrado de la carga de trabajo de cada sector, el equipo es capaz de dimensionar y distribuir previamente las cuadrillas de trabajo.

Por último, el tiempo horizonte del *lookahead* es definido por el equipo técnico. Para ello, considera el avance del proyecto y la eficiencia del equipo para predecir las actividades. Es decir, en la etapa inicial, el tiempo horizonte será entre 2 – 3 semanas, y a medida que avance el proyecto y se incremente la cantidad de tareas anticipadas y completadas, el periodo se prolongará entre 4 – 6 semanas.

4.1.4 *Commitment Planning* - Modelo 4D para la reunión de programación

En la presente etapa, el modelo consta de dos partes. En primer lugar, se elabora un Modelo 4D tentativo con las actividades a realizar durante la semana, para ello es necesario comprobar que las tareas no presenten restricciones que competen al equipo técnico. En segundo lugar, en el modelo 3D se edita y se distribuye visualmente los elementos modelados y se elabora el modelo 4D. Este último, se presenta en la reunión de programación y se dialoga con los últimos planificadores. Finalmente, en base a las observaciones, se modifica el modelo y se elabora el álbum de imágenes.

Al implementar el modelo 4D en la reunión, el nivel de formación académica del personal no es una barrera para que la planificación sea comprendida. Asimismo, mejora la comunicación entre los involucrados y la visualización de los entregables de cada cuadrilla de trabajo. De tal manera que, los capataces se comprometen con el cumplimiento de las actividades.

Asimismo, el desarrollo de dos escenarios para cada día, mañana y tarde, permite que el capataz o subcontratista comprenda las tareas diarias que se traslapan en la misma localización y mejore el control del ritmo de producción cada partida (Murguía, D. & Brioso, X., 2017).

A continuación, se presenta la programación de un día.

Lunes 20 Febrero - Mañana

- Encofrado P5 S1 (72m2)
- Acero P4 S2
- Culminar Fondo/Costado TP4 S2
- Culminar Acero TP4 S2
- Apuntalado TP4 S2
- Acero Escalera P3 ???

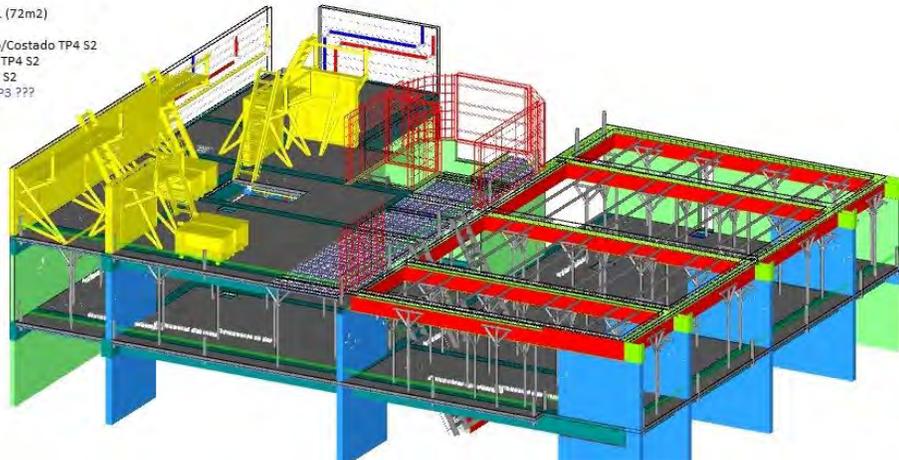


Fig. 4.1.4.1 Programación de tareas - mañana.
Fuente: Elaboración propia

Lunes 20 Febrero - Tarde

- Concreto P4 S2 (6 m3)
- Acero P4 S2
- Prelosas TP4 S2
- Desencofrado P4 S3 (pendiente)
- Acopio de encofrado P5 S2??
- Acero Escalera P3 ???
- Instalaciones P5 S2

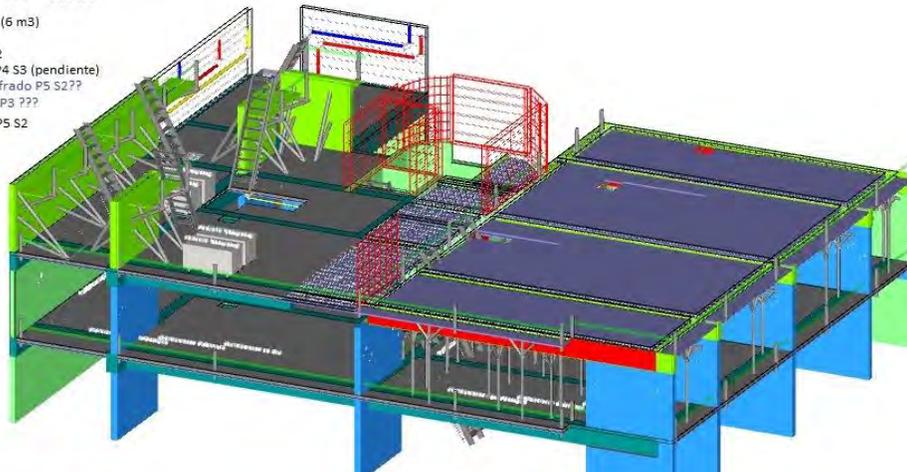


Fig. 4.1.4.2 Programación de tareas - tarde.
Fuente: Elaboración propia

4.1.5 Virtual Huddle – Modelo 4D para las cuadrillas de trabajo

Durante el proceso de ejecución, el modelo 4D permite la adecuada transmisión de la planificación a las cuadrillas de trabajo. De modo que, el personal obrero conoce el entregable semanal y el entregable diario, ya que, frecuentemente, el personal de cada cuadrilla no se entera del alcance semanal. Lo último se da por varias razones, entre las cuales se encuentra las siguientes: el capataz transmite oralmente las tareas diarias que

son coordinadas al inicio de cada jornada según el frente de trabajo disponible; el subcontratista o capataz no transmite la planificación semanal por ser tedioso de explicar con cuadros de Excel; poco interés por parte del personal por conocer el alcance semanal; la información 2D genera interpretaciones ambiguas; los diferentes niveles de conocimiento y la experiencia del personal hace que solo algunos entiendan la planificación en cuadros de Excel.

Ante lo expuesto, se propone adherir la herramienta *Virtual Huddle*, el cual indica que la presentación del trabajo diario en un modelo virtual proyectado ayuda a transmitir la planificación a los constructores finales. De este modo, se obtiene mejores resultados en cuanto a tiempo, costo y plazo. Así como, evita que la programación pase por varios intermediarios, donde existe el riesgo de que no se transmita de manera correcta.

Para la aplicación de la herramienta, se reúne a cada cuadrilla de trabajo junto al modelo 4D, el cual es expuesto a través de un proyector. Luego, se da a conocer el objetivo semanal y se asigna el entregable diario a cada operario. En esta reunión, los elementos auxiliares facilitan el entendimiento de la planificación, pues son cercanos a la realidad. Además, la reunión diaria entre el equipo técnico y el personal se lleva a cabo al inicio de la jornada.

4.1.6 Ejecución - Registro Semanal y Seguimiento con el Modelo 4D

La presente etapa está compuesta por dos partes. El primero concierne a la elaboración del álbum de imágenes y el segundo, al registro fotográfico o el modelo 4D con información del trabajo ejecutado.

El álbum de imágenes ayuda a realizar un seguimiento del compromiso semanal. Para ello, se debe brindar un álbum a cada grupo de trabajo y una persona del equipo técnico debe visitar al capataz y, junto al álbum, verificar el cumplimiento de las actividades en los horarios establecidos.

En caso de presentar desfases, se debe indagar la causa y buscar alternativas de solución. Finalmente, la causa identificada de atraso o no cumplimiento se dialoga en la reunión de planificación.



Fig. 4.1.6.1 Album de imágenes a los capataces.
Fuente: Elaboración propia

La presentación del álbum de imágenes está adaptada para empresas medianas que se encuentran en proceso de implementación y cuyo nivel académico del personal es básico. El objetivo final es realizar un seguimiento de las actividades con herramientas virtuales como iPads o tablets, tal como se viene realizando en empresas de mayor envergadura.

La presentación de fotografías del trabajo realizado y/o presentar el modelo 4D con el trabajo ejecutado ayuda a promover la participación de los involucrados e identificar causas de no cumplimiento, a fin de proponer posibles medidas correctivas.

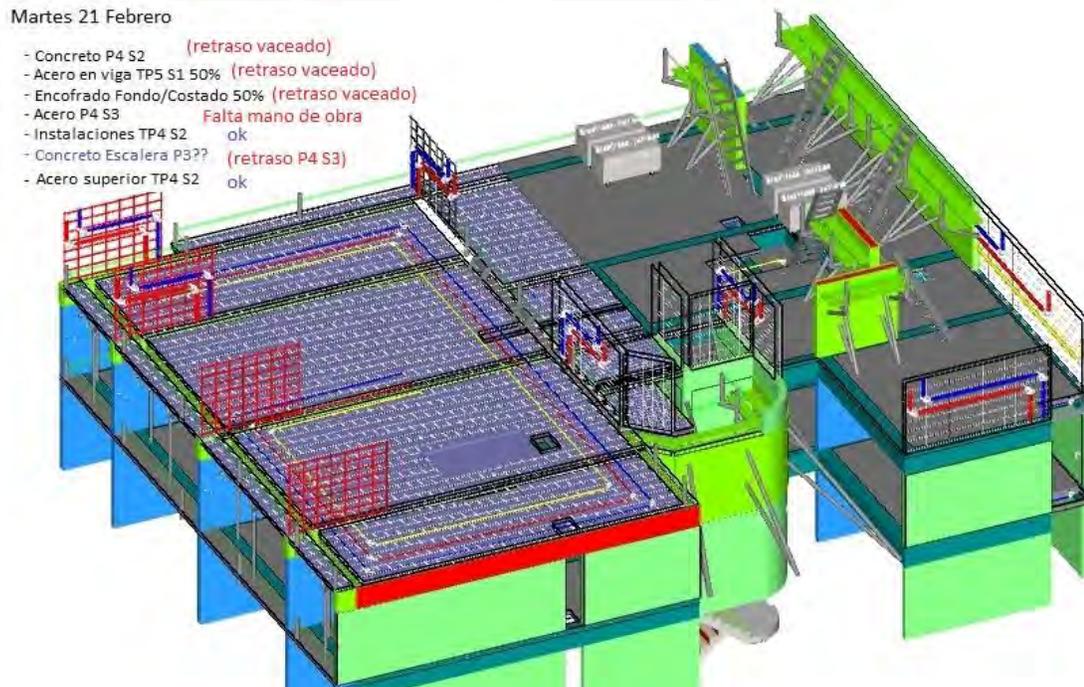


Fig. 4.1.6.2 Revisión de cumplimiento de tareas.
Fuente: Elaboración propia

A continuación, se describirá los criterios de modelado 3D y 4D, con la finalidad de ahorrar tiempo en la elaboración del modelo de estructuras.

4.2 Criterios de Modelado 3D

El nivel de desarrollo mínimo para los elementos estructurales es el LOD 300, pues incluye metrados y ubicación exacta. A medida que se afina la programación y la secuencia de construcción se migrará hacia el LOD 350, pues maneja razones de constructabilidad y sectorizaciones. Asimismo, el nivel de desarrollo de los elementos auxiliares se encuentra entre LOD 100 y LOD 350.

Entre los principales criterios de modelado se detalla lo siguiente:

- Modelar los elementos verticales hasta el fondo de viga o losa, pues el último tramo se vacía junto a los elementos horizontales.



Fig. 4.2.1 Muro modelado hasta el fondo de viga.
Fuente: Elaboración propia

- Modelar la losa aligerada, losa maciza y vigas partidas a un tercio, ya que facilita la sectorización.



Fig. 4.2.2 La losa aligerada cortada a un tercio.
Fuente: Elaboración propia

- Crear parámetros de identificación de cada elemento. En el proyecto, se detalló los siguientes parámetros:

- Nivel de Elemento: Para los elementos verticales se usa el nombre del piso en que se encuentra, por ejemplo, "Piso 01". Para elementos horizontales se usa la palabra 'Techo' seguido del nivel de piso en que se encuentre el vertical que lo sostiene, por ejemplo, 'Techo Piso 01'. Además de separar niveles, permite diferenciar entre elementos verticales y horizontales que serán de utilidad para realizar cuantificaciones y para la búsqueda de elementos en el modelo 4D. Sin embargo, es posible el modelador defina otra nomenclatura que le resulte cómodo.
- Elemento: Indica el tipo de elemento, los cuales son viga, losa maciza, losa prefabricada, muro, columna, acero u otro elemento. De esta manera, facilita la cuantificación y la búsqueda de elementos en el modelo 4D.
- Comentarios: Se utiliza para determinar si los elementos son verticales, horizontales o elementos auxiliares. Además, ayuda para ocultar elementos mediante filtro y obtener una mejor visualización de la zona deseada.
- Sector: Indica el sector a la que pertenece el elemento. Así, facilita al enlazado de los elementos con las tareas programadas. También, es útil para realizar iterar sectorizaciones tentativas y agrupar elementos en Navisworks.
- Partida: Indica la partida a la cual pertenece cada elemento, lo cual sirve para agrupar los elementos de acuerdo al desglose de las tareas.
- Día: Indica la fecha planificada de construcción del elemento.

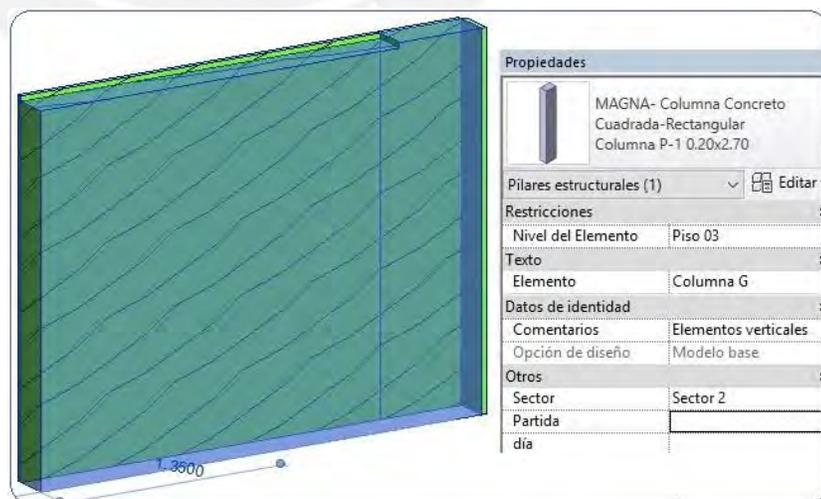


Fig. 4.2.3 Parámetros del elemento.
Fuente: Elaboración propia

- Para juntar el metrado de distintos elementos se elabora un cómputo de materiales en lugar de una tabla de planificación, en el cual se define el campo Material: Área o Material: Volumen y se filtra el Material: Como pintura = No, a fin de evitar contar dos veces un mismo metrado. Además, esta herramienta permite juntar el metrado de elementos horizontales y verticales tanto en áreas como en volúmenes.

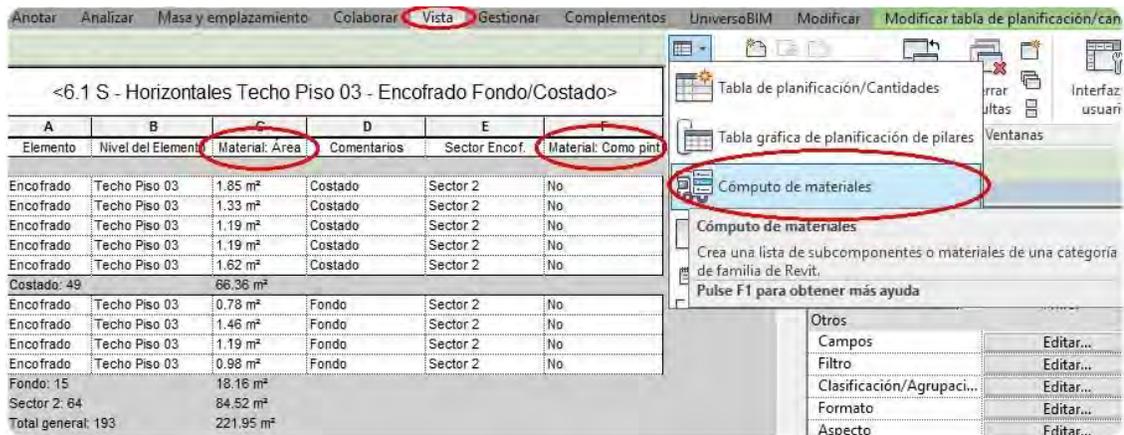


Fig. 4.2.4 Tabla de cuantificación.
Fuente: Elaboración propia

- Modelar la rampa recta especificado por la pendiente, pues facilita la sectorización y división de la rampa, ya que solo se eleva un extremo el valor de longitud acortada por la pendiente.

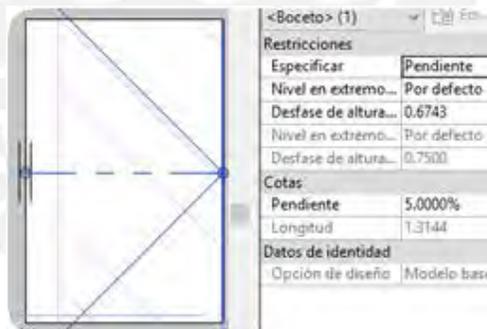


Fig. 4.2.5 Detalle de rampa.
Fuente: Elaboración propia

- Para representar rampas no rectas se realiza los pasos siguientes: modelar una losa maciza con la silueta de la rampa; hacer clic en la opción modificar suelo y colocar los puntos deseados; colocar puntos en los bordes de la rampa y en el centro para incluir el porcentaje de bombeo; hacer clic en cada punto central y colocar la altura de desfase respecto del nivel inferior, cuyo cálculo depende de la distancia central y de la pendiente de la rampa; y, finalmente, colocar el desfase de altura entre el punto central y el punto ubicado en el borde, el desfase está determinado por la distancia del borde al centro y por el porcentaje de bombeo.

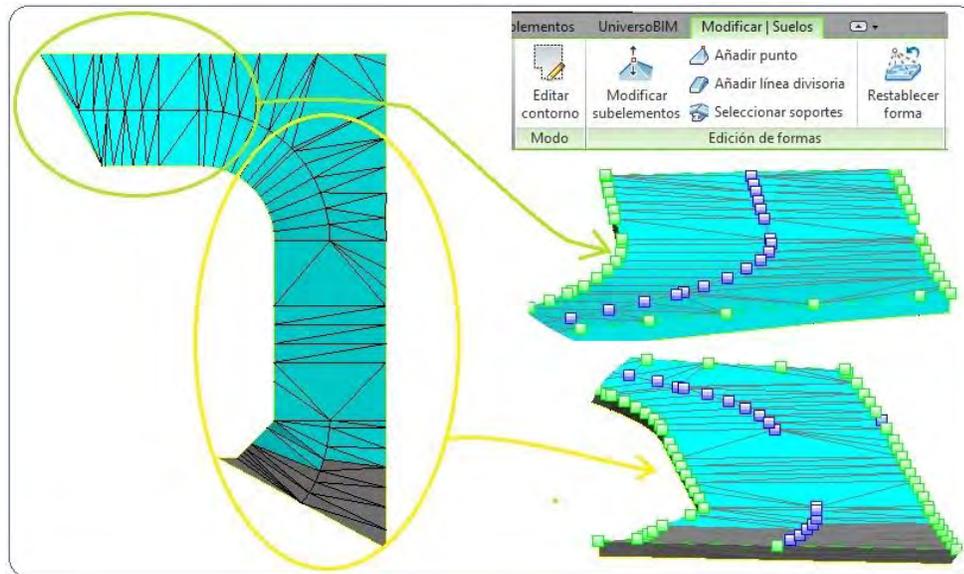


Fig. 4.2.6 Modelado de rampa no recta.
Fuente: Elaboración propia

- Modelar los elementos verticales tales como muros, placas y columnas como si fueran muros, pues facilita la inserción de refuerzo de acero estructural que será incluida como elemento auxiliar. Para diferenciar cada elemento se utiliza un material distinto o se especifica en el parámetro Elemento. Además, si la columna o placa interfiere con algún muro se debe colocar la característica de 'no permitir unión' a fin de mantener la geometría especificada.

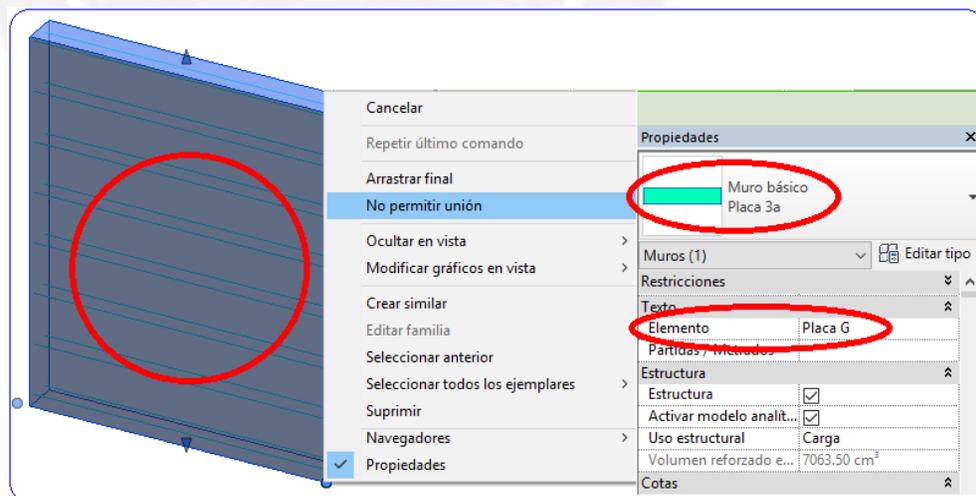


Fig. 4.2.7 Placa modelado como muro.
Fuente: Elaboración propia

- Modelar los elementos repetitivos con la herramienta matriz, puesto que genera grupos de modelo que requiere de un único modelo inicial y permite replicar el modelo la cantidad deseada.

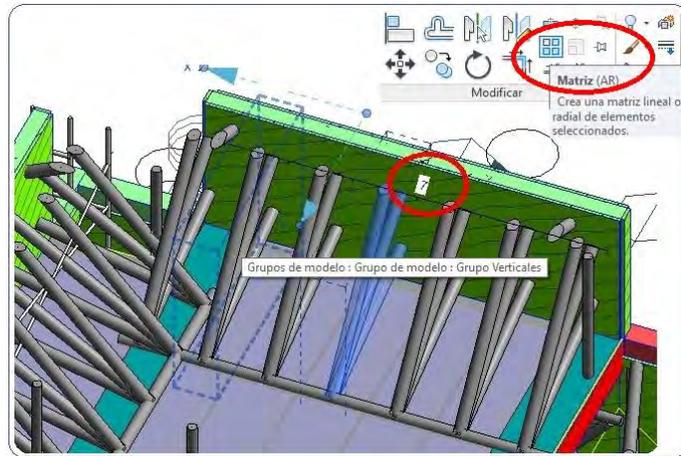


Fig. 4.2.8 Modelado de apuntalado vertical con grupos de modelo.
Fuente: Elaboración propia

- De acuerdo a los parámetros establecidos, es posible ocultar elementos por filtro, a fin de observar solo el nivel o los elementos deseados. Para ello, se define el tipo de filtro a realizar, es decir, se establece las reglas de filtro y los elementos a filtrar.

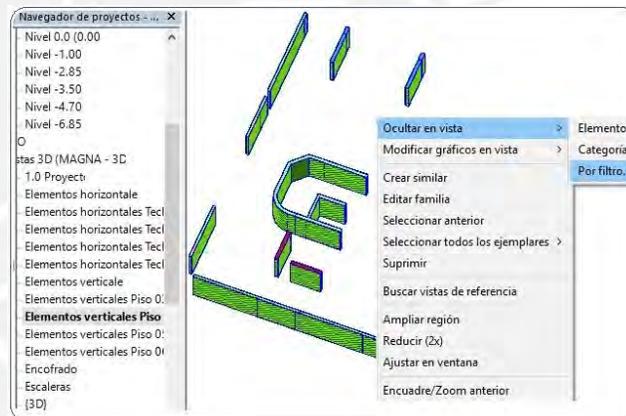


Fig. 4.2.9 Filtro de elementos.
Fuente: Elaboración propia

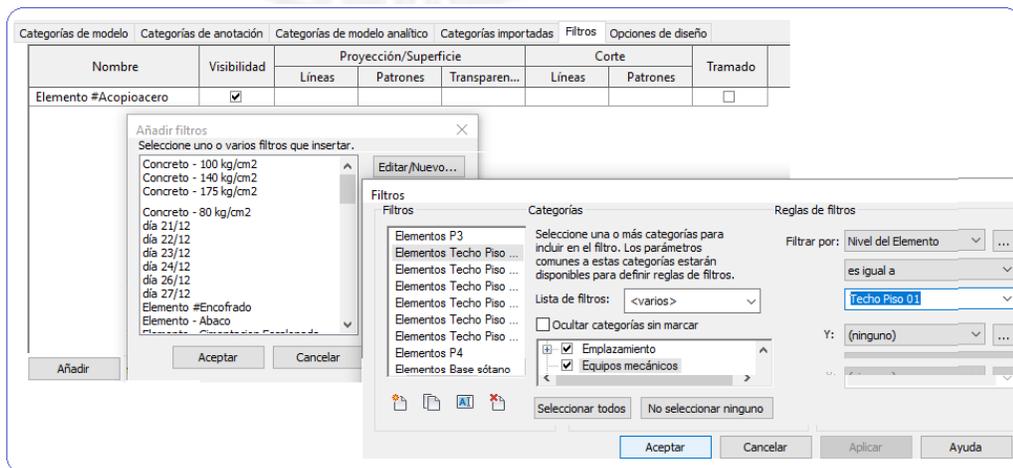


Fig. 4.2.10 Filtro de elementos.
Fuente: Elaboración propia

- Vincular los planos de AutoCAD al nivel de planta correspondiente en Revit. Dado que, si se modifica la sectorización en AutoCAD, entonces al actualizar el modelo también se modifica los planos vinculados en cada planta.

Este criterio se utiliza en proyectos cuyo encargado realiza la sectorización en planos AutoCAD 2D y el modelador debe ceñirse o proponer otra sectorización realizada en Revit.



Fig. 4.2.11 Plano en AutoCAD sectorizado y Modelo virtual actualizado.
Fuente: Adaptado proyecto Tándem

4.3 Criterios de Modelado 4D

Para un adecuado modelo 4D, se recomienda lo siguiente:

- Al exportar el modelo 3D desde el software Revit es importante configurar la conversión de los parámetros de los elementos a Todos, sino no aparecerá los parámetros definidos como Elemento, Nivel de Elemento, etc.

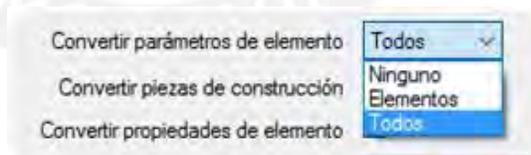


Fig. 4.3.1 Conversión de parámetros.
Fuente: Elaboración propia

- Antes de iniciar el modelado, configurar el espacio de trabajo a modo extendido, pues presenta mayor accesibilidad a los campos más usados, tales como *timeliner*, *sets*, *quantification*, buscador de elementos, entre otros.

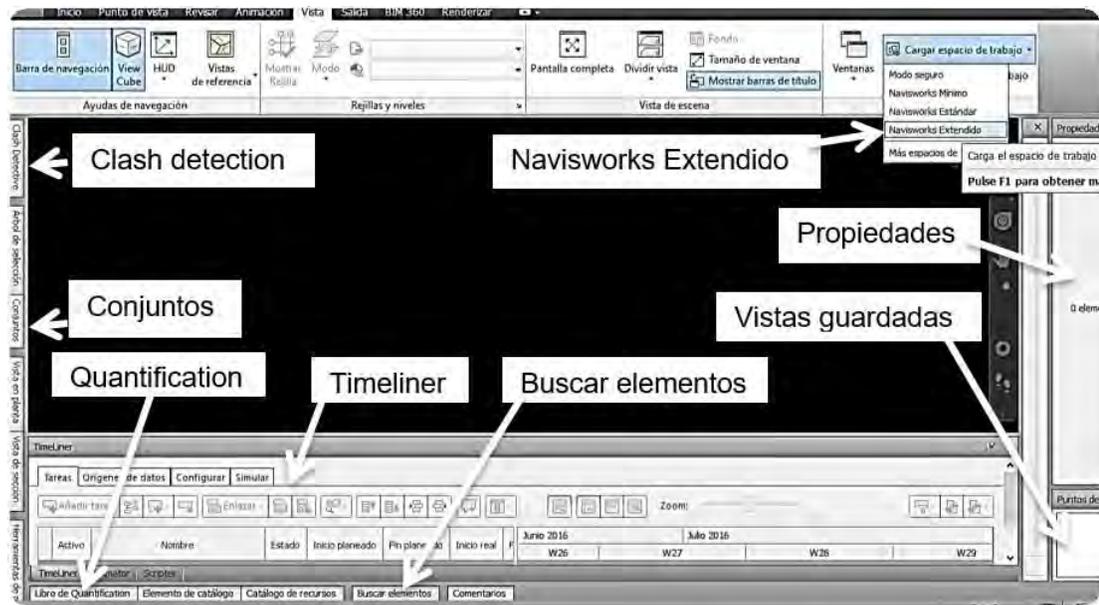


Fig. 4.3.2 Interfaz de Navisworks extendido.

Fuente: Elaboración propia

- Si se desea exportar nuevamente el modelo 3D con información adicional es necesario colocar el mismo nombre en el formato nwc. y en el programa Navisworks abrir el archivo con el mismo nombre, pero en formato nwf. Ello no modificará los avances realizados en el modelo 4D, solo actualizará la nueva información.
- Para visualizar de manera adecuada la selección de tareas es pertinente crear puntos de vistas de distintos niveles de la edificación, tanto niveles horizontales como verticales.

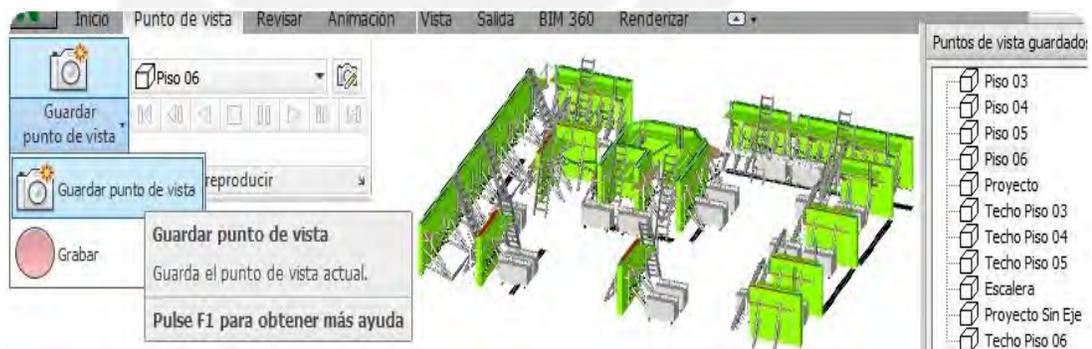


Fig. 4.3.3 Guardado de puntos de vista.

Fuente: Elaboración propia

- El cronograma desarrollado en Ms. Project, Primavera o Excel debe ser incluido en los orígenes de datos del Timeliner, pues al modificar el cronograma se actualiza el origen y no se pierde el trabajo desarrollado al enlazar los elementos a las tareas.

- Para una rápida asignación de tareas es necesario crear conjuntos con el mismo nombre de las tareas. Para ello, se sitúan los criterios de búsqueda, es decir, se busca de acuerdo a los parámetros definidos en el modelo 3D. Luego, al seleccionar el conjunto creado permite ver si los elementos son los deseados.

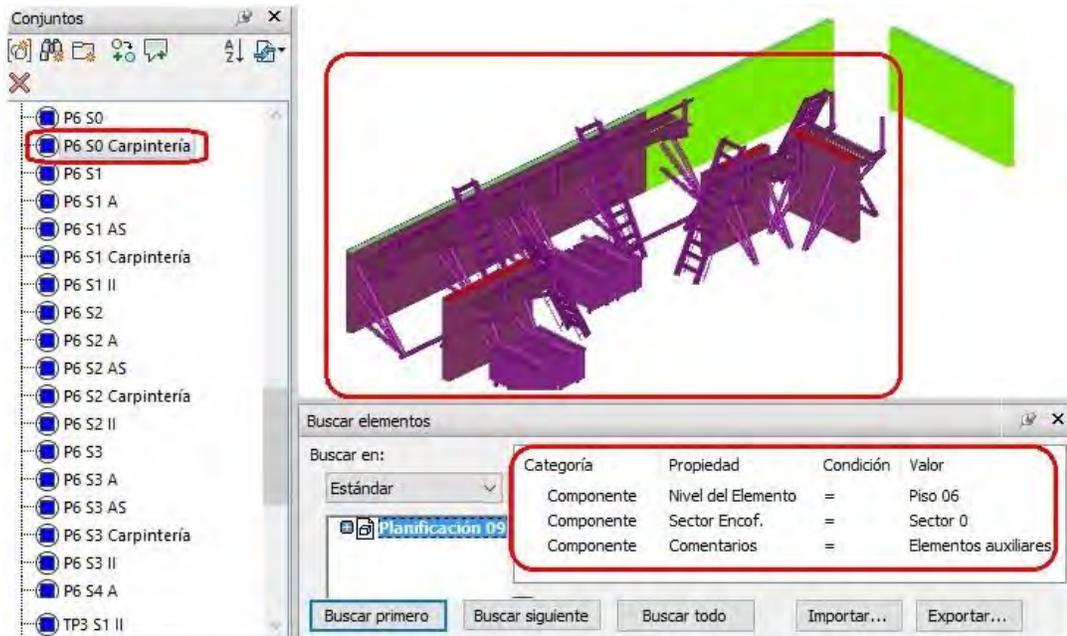


Fig. 4.3.4 Creación de conjuntos.
Fuente: Elaboración propia

- Para enlazar los elementos en el timeliner se escoge la opción enlazado automático para los conjuntos y actividades con igual nombre. Asimismo, es recomendable usar una nomenclatura para un fácil entendimiento.

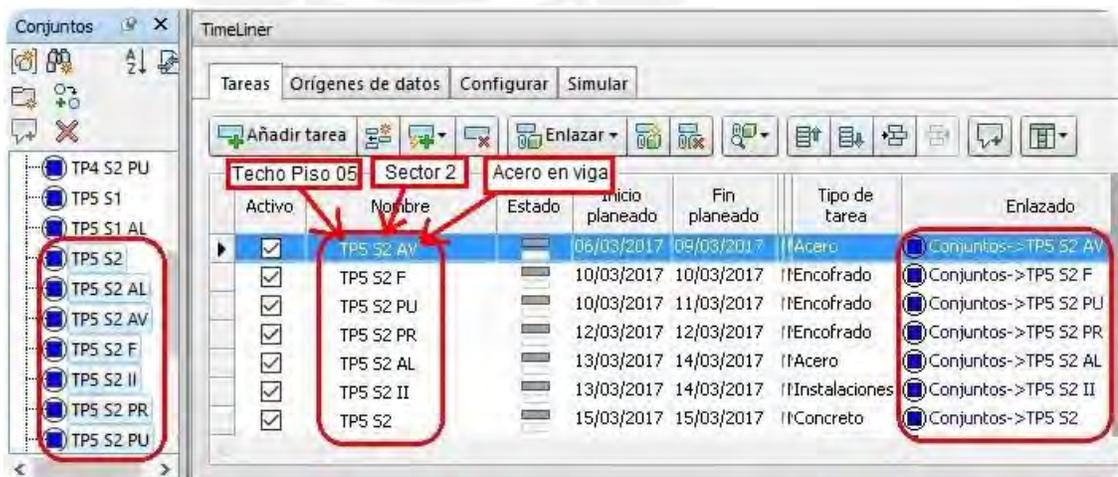


Fig. 4.3.5 Asignación automática de elementos a tareas y nomenclatura de tareas.
Fuente: Elaboración propia

- Para mostrar una secuencia de procesos es necesario adicionar tipos de tarea al Timeliner, así como se debe configurar el color de inicio de cada actividad y el color de término. Además, es posible crear nuevos aspectos para evitar repetir colores.

Nombre	Aspecto de inicio	Aspecto de fin
Encofrado	Amarillo (90% transparente)	Amarillo
Topografía	Rojo (90% transparente)	Rojo
Eléctrico	Violeta (90% transparente)	Violeta
Ladrillo	Blanco	Blanco
Inst. Sanitarias	Verde (90% transparente)	Verde
Acero	Verde (90% transparente)	Gris
Vaciado	Verde	Aspecto de modelo
Curado	Verde (90% transparente)	Gris
Sempulido	Verde (90% transparente)	Blanco

Fig. 4.3.6 Asignación de colores a las partidas.
Fuente: Elaboración propia adaptado al proyecto Tandem

Definiciones de aspecto

Nombre	Color	Transparencia
Color deseado.		<input type="text" value="40"/>

Añadir Suprimir

Aspecto de inicio de simulación predeterminado:
Ocultar

Aceptar Cancelar

Fig. 4.3.7 Creación de nuevos aspectos.
Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 5: CASO DE ESTUDIO

El presente capítulo desarrolla la integración del *Last Planner System* y BIM para la etapa de *Commitment Planning* y Ejecución - Registro y Medición de métricas del modelo de integración propuesto. La integración en la etapa de *Master Schedule*, *Phase Schedule*, *Lookahead planning* y *Virtual Huddle* no forman parte del alcance de la presente tesis.

Asimismo, durante el proceso de implementación, el equipo técnico ejecutó el casco estructural entre el piso 2 y el piso 6. Además, al término de cada semana, se recolectó los datos que indican la performance de la planificación. Finalmente, el proyecto empleó el sistema de acero predimensionado, losas prefabricadas y consta de elementos convencionales de concreto armado.

5.1 Descripción del proyecto

El proyecto “RESIDENCIAL LA GLORIA II” es construido por el consorcio CISSAC Y SUN FIRE S.A.C. Se ubica en la esquina calle Carmenca N° 191 con calle Tiahuanaco N° 145, en el distrito de San Miguel, provincia y departamento de Lima; y, se desarrolla sobre un área de 437 m².

La edificación multifamiliar consta de 6 pisos, 1 sótano y 1 semisótano. Asimismo, el conjunto residencial está compuesto por 21 departamentos y 21 estacionamientos. La duración estimada de construcción es de 8 meses, se inició el 3 de octubre del 2016 y se espera entregar en junio del 2017. Al término de la presente investigación, el proyecto se encontraba en la construcción del piso 6.



Fig. 5.1.1 Proyecto RESIDENCIAL LA GLORIA II.
Fuente: Cissac

5.2 Organigrama del proyecto

La empresa constructora CISSAC está a cargo de las áreas siguientes: Residencia, Administración, Oficina Técnica y Seguridad. Asimismo, las empresas PYC SIN FRONTERAS, INKAFFERRO, ESCATE y JR&JM son subcontratadas de las partidas de encofrado y concreto, acero, instalaciones sanitarias e instalaciones eléctricas, respectivamente.

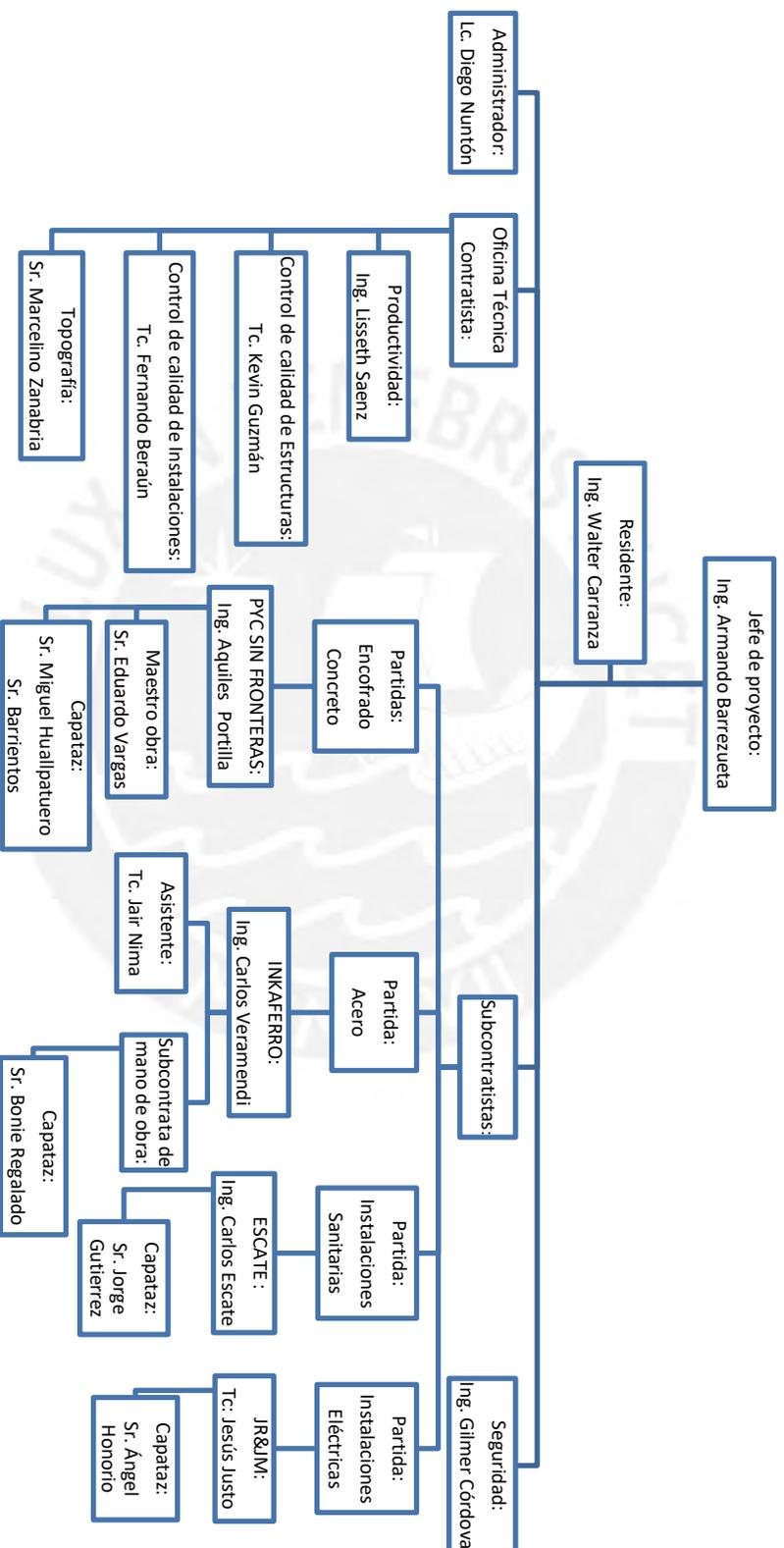


Fig. 5.2.1 Estructura organizacional de la obra.
Fuente: Obra RESIDENCIAL LA GLORIA II

5.3 Recurso tecnológico

Se utilizó los siguientes softwares: *Revit Educational* 2016, para la manipulación del modelo 3D; *Navisworks Manage Educational* 2016, para integrar el factor tiempo al modelo 3D; y *Autocad Educational* 2016, para recibir la información del diseño Estructural. El cronograma de obra fue realizado de manera directa en el software *Navisworks*.

Respecto al hardware, se utilizó un ordenador portátil cuyas características son las siguientes:

- Procesador i7
- 6GB de memoria RAM
- Pantalla de 15"
- 3GB de video

5.4 Recolección de datos

Se realizó en dos escenarios. En el primer escenario no se implementó BIM y se recolectó la planificación semanal elaborada por el equipo técnico. En el segundo escenario se implementó BIM y se planteó la planificación semanal y se discutió con los capataces antes de la reunión de programación con los subcontratistas. Asimismo, el primer escenario duró 4 semanas y el segundo escenario, 5 semanas. Finalmente, al término de cada semana, se identificó las tareas completadas y las causas de no cumplimiento.

5.4.1 Escenario 1

Se desarrolló desde el 02 de enero hasta el 28 de enero, y la planificación se realizó en base al *Last Planner System*, cuya implementación se encuentra en proceso en la empresa constructora.

02-Ene	07-Ene	09-Ene	14-Ene	16-Ene	21-Ene	23-Ene	28-Ene
Semana 1		Semana 2		Semana 3		Semana 4	

Fig. 5.4.1.1 Cronograma - Escenario 1.
Fuente: Elaboración propia

El *master schedule* y *phase schedule* fue realizado al inicio del proceso de construcción. Asimismo, la ingeniera de campo se encargaba de realizar el lookahead, la programación semanal, analizar el PPC y elaborar la frecuencia de causas de no cumplimiento.

En el presente escenario, el tesista presencié la reunión de planificación, a fin de evaluar el performance de la comunicación y visualización, así como se adquirió los documentos de planificación para realizar el análisis cuantitativo. Asimismo, para el análisis cualitativo, el tesista efectuó una entrevista semiestructurada al equipo técnico, subcontratistas y capataces con el objetivo de describir la eficiencia de las herramientas empleadas, tales como planos 2D y cuadros de Excel.

5.4.1.1 Planificación semanal

La reunión de planificación se realizaba los días viernes, de 10am a 12pm y se desarrollaron en las fechas siguientes:

Fecha de reunión de planificación Subcontratistas	
Semana 1	30/12/2016
Semana 2	06/01/2017
Semana 3	13/01/2017
Semana 4	20/01/2017

Fig. 5.4.1.1.1 Fecha de reuniones - Escenario 1.
Fuente: Elaboración propia.

La agenda de cada reunión fue el siguiente:

- Informar el porcentaje de plan completado de la semana y dialogar las causas de no cumplimiento identificadas por el equipo técnico.
- Aportes/Comentarios de los presentes.
- Presentación de la programación semanal en base a la sectorización realizada.



Fig. 5.4.1.1.2 Reunión de planificación RGII.
Fuente: CISSAC S.A.

La sectorización de vaciado de concreto de elementos horizontales está delimitada por el abastecimiento mínimo de prelasas. Dado que el área es reducida, el proveedor Entrepisos Lima accedió enviar en dos tandas como máximo. Los elementos verticales fueron divididos en 3 sectores.

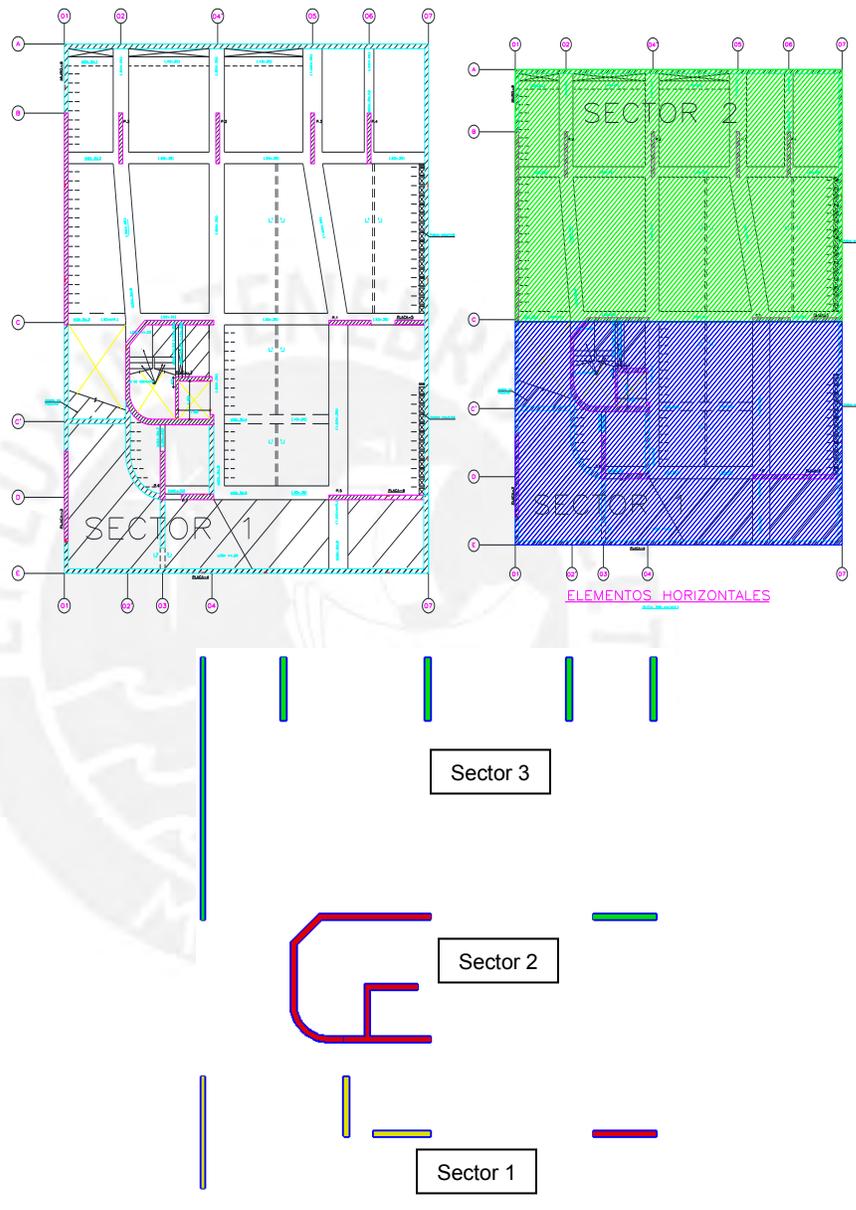


Fig. 5.4.1.1.3 Planta típica y sectorización de elementos horizontales y verticales.
Fuente: CISSAC S.A.

Debido a que, la sectorización es reducido, el personal se involucra en varias actividades. Por ejemplo, la partida de encofrado se extiende a la colocación de prelasas, encofrado de elementos verticales, horizontales y escalera. Esta práctica dificulta el ritmo estable de producción y el aprendizaje continuo basado en la repetición de tareas.

El resultado de la reunión de planificación se detalló en un cuadro de Excel y la secuencia del proceso de ejecución se explica en el punto 5.4.1.2.1.



NOMBRE DE PROYECTO: RESIDENCIAL LA GLO		SEMANA 3					
PROPIETARIO: CONSORCIO CISSAC-SUN FIRE		16/01/2017	17/01/2017	18/01/2017	19/01/2017	20/01/2017	21/01/2017
Cód	Descripción de la Actividad						
4	MUROS Y PLACAS SUPERESTRUCTURA (1-6)						
	Trazo columnas-muros	SV1-P1		SV2-P1			SV1-P2
	ACERO						
	Acero columnas-muros		SV2-P1			SV1-P2	
	ENCOFRADO						
	Encofrado muros-columnas	SV1-P1	SV1-P1	SV2-P1	SV2-P1		SV1-P2
	CONCRETO						
	Concreto muros-columnas		SV1-P1		SV2-P1		
	DEENCOFRADO						
	Desencofrado Y CURADO muros-columnas			SV1-P1		SV2-P1	
5	TECHO SUPERESTRUCTURA (1-6)						
	ACERO						
	Acero en vigas			SH 1- P1	SH 1- P1		SH 2- P1
	Acero en losa						SH 1- P1
	Acero en escalera						SH 1- P1
	ENCOFRADO						
	Encofrado de fondo de vigas				SH 1- P1		
	Encofrado de costado de vigas				SH 1- P1		
	Apuntalado de losas						
	Encofrado de fondo de escalera						SH 1- P1
	Encofrado de pasos de escalera						
	PRELOSAS						
	Colocación de prelosas					SH 1- P1	
	INSTALACIONES						
	IIEE + IS						SH 1- P1

Fig. 5.4.1.1.4 Lookahead de la semana 3.
Fuente: CISSAC S.A.

5.4.1.2 Medición de indicadores cuantitativos y cualitativos

5.4.1.2.1 Porcentaje de Plan Completado

La presente medición corresponde desde la construcción de elementos verticales del semisótano hasta elementos verticales del piso 02. Para ello, se consideró lo siguiente:

- Se consideró solo valores de 0 y 1. Donde, 0 es para la actividad no completada, independiente del avance que obtuvo y 1 son para las tareas completadas al 100%.
- Se analizó el cumplimiento de cada sector como una tarea independiente, no como el cumplimiento de un conjunto de sectores de una determinada partida.

Descripción de la Actividad	23/01/2017	24/01/2017	25/01/2017	26/01/2017	27/01/2017	28/01/2017	PPC
MUROS Y PLACAS SUPERESTRUCTURA (1-6)							
Trazo columnas-muros				SV1-P2		SV2-P2	
ACERO							
Acero columnas-muros		SV1-P2	SV2-P2	SV3-P2			17

Fig. 5.4.1.2.1.1 Evaluación habitual en el proyecto
Fuente: Adaptado a la programación desarrollada por Cissac

Descripción de la Actividad	23/01/2017	24/01/2017	25/01/2017	26/01/2017	27/01/2017	28/01/2017	PPC
MUROS Y PLACAS SUPERESTRUCTURA (1-6)							
Trazo columnas-muros				SV1-P2		SV2-P2	
ACERO							
Acero columnas-muros		SV1-P2					1?
Acero columnas-muros			SV2-P2				1?
Acero columnas-muros				SV3-P2			1?
ENCOFRADO							

Fig. 5.4.1.2.1.2 Evaluación realizada

Fuente: Adaptado a la programación desarrollada por Cissac

- El vaciado de elementos horizontales, por una limitación del proveedor de prelosas, se separó en dos sectores.
- El vaciado de elementos verticales se dividió en tres sectores.
- La secuencia de actividades en los elementos horizontales es el siguiente:
 - o Encofrado fondo/costado en viga
 - o Colocación de acero en viga
 - o Apuntalado para sostener la prelosa
 - o Colocación de la prelosa
 - o Acero superior e inferior en prelosa
 - o Colocación de instalaciones en prelosa
 - o Vaciado de concreto
 - o Curado
 - o Desencofrado de costado de viga
 - o Desapuntalado de techo y desencofrado de fondo de viga
- La secuencia de actividades en elementos verticales es el siguiente:
 - o Acero
 - o Encofrado
 - o Concreto
 - o Desencofrado
 - o Curado
- La secuencia de actividades en escaleras es el siguiente:
 - o Encofrado fondo
 - o Colocación de acero
 - o Encofrado de pasos
 - o Vaciado de concreto
 - o Curado
 - o Desencofrado de pasos y fondo

5.4.1.2.2 Causas de No Cumplimiento

En el proyecto se consideró el catálogo de causas de no cumplimiento siguiente:

PROGRAMACION(PROG)	LOGISTICA (LOG)	EJECUCIÓN (EJEC)
Todas las causas que implican: * Errores o cambios en la programación. * Inadecuada utilización de las herramientas de programación. * Mala asignación de recursos. * Cualquier restricción que no fue identificada de manera oportuna.	Todas las causas que implican: * Falta de equipos, herramientas o materiales en obra, que han sido requeridos oportunamente por Producción.	Se consideran las causas que corresponden a atrasos debido a retrabajos en el proceso constructivo, es decir que por errores de ejecución no se pudieron cumplir otras actividades programadas. Falta de seguimiento y control en campo por encargados de campo.
CLIENTE (CLI)	TRABAJO PRE REQUISITO (TPR)	SUBCONTRATAS (SC)
Todas las causas que implican: * Responsabilidad del cliente (falta de información, cambio de prioridades, cambios o errores en la ingeniería, falta de liberación de estructuras, etc).	Todas las causas que implican: * Falta en la entrega de algún entregable de una partida a otra.	Todas las causas que implican: * Falta en la entrega de algún recurso subcontratado. * Atraso debido al no cumplimiento de alguna labor encargada a una subcontrata.
EQUIPOS (EQ)	ADMINISTRATIVOS (ADM)	EXTERNOS (EXT)
Todas las causas que implican: * Averías o fallas en los equipos. * Mantenimientos no programados de equipos.	Todas las causas que implican: * No llegada del personal especializado (incluido subcontratos). * Falta de permisos y licencias.	Todas las causas que implican: * Retrasos por razones climáticas extraordinarias. * Eventos extraordinarios como marchas sindicales sin previo aviso, huelgas, accidentes, etc.

Fig. 5.4.1.2.2.1 Catálogo de Causas de No Cumplimiento.
Fuente: Adaptado al catálogo desarrollado por Cissac

5.4.1.2.3 Task Made Ready

Para la medición del presente indicador, se consideró el siguiente esquema:

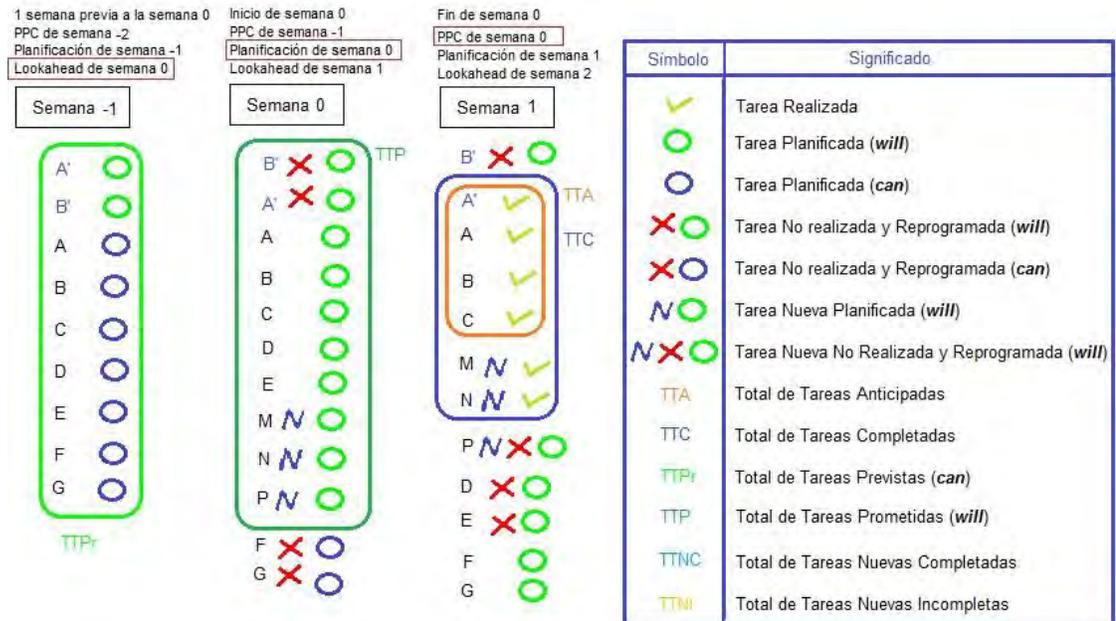


Fig. 5.4.1.2.3.1 Esquema de tareas.
Fuente: Elaboración propia

Las tareas A' y B' han sido planificadas en la semana -1, pero no se han completado. Luego, en la semana 1, se completó la tarea A'. Dado que, A' posee dos semanas de

duración, se consideró en el cálculo del TMR de la semana 0. Si la tarea B', se concluye en la semana 2, entonces será parte del cálculo del TMR de la semana 1.

Las restricciones de las tareas D y E se han removido, por ello fueron parte de la planificación semanal de la semana 0. Sin embargo, debido a diversos factores no se logró completar. Por ello, han sido reprogramadas en la planificación semanal de la semana 1 y no forma parte del cálculo del TMR de la semana 0.

Finalmente, el valor del TMR está determinado por la división entre las tareas anticipadas (A', A, B y C) y las tareas prometidas en la semana -1 (A', B', A, B, C, D, E, F y G).

En síntesis:

$$TMR = \frac{TTA (A', A, B, C)}{TTPr (A', B', A, B, C, D, E, F, G)}$$

5.4.1.2.4 *Task Anticipated*

Para la medición del indicador, se consideró el esquema de la Fig. 5.4.1.2.3.1 y se describe lo siguiente:

Las tareas no completadas D y E son parte del cálculo de TA máximo de la semana 0.

Las tareas M, N y P han sido incorporadas en la semana 0. Por ello, son tareas nuevas y forman parte de las tareas prometidas. Al término de la semana, solo las tareas M y N han sido completadas y la tarea P está incompleta. Motivo por el cual se reprogramará en la semana 1. Las tareas M y N son parte del total de tareas nuevas completadas (TTNC) y la tarea P del total de tareas nuevas incompletas (TTNI).

El cálculo del TA mínimo está determinado por la división entre las tareas anticipadas (A', A, B y C) y las tareas prometidas en la semana 0 (A', B', A, B, C, D, E, M, N y P). Asimismo, el valor de TA máximo está definido por el cociente de la diferencia entre las tareas prometidas en la semana 0 (A', B', A, B, C, D, E, M, N y P) y las tareas nuevas completas o incompletas (M, N y P), y las tareas prometidas en la semana 0.

En resumen:

$$TA \text{ mín} = \frac{TTA (A', A, B, C)}{TTP (A', B', A, B, C, D, E, M, N, P)}$$

$$TA \text{ máx} = \frac{TTP (A', B', A, B, C, D, E, M, N, P) - (TTNC (M, N) + TTNI (P))}{TTP (A', B', A, B, C, D, E, M, N, P)}$$

5.4.1.2.5 Entrevista semiestructurada

La entrevista se aplicó a los tres grupos siguientes: contratistas, subcontratistas y capataces. Asimismo, se realizó presencialmente, para aclarar cualquier duda eventual. Los grupos fueron conformados de la siguiente manera:

- Contratista:
 - o Jefe de Proyectos: Ing. Armando Barrezueta Maceda
 - o Ing. Residente: Ing. Walter Carranza Cárdenas
 - o Ing. Producción: Ing. Lisseth Sáenz Lama
 - o Asist. Campo: Tc. Kevin Guzmán Rodas
- Subcontratista:
 - o Encofrado y Concreto: Tc. Aquiles Portilla Costilla
 - o Acero: Tc. Jair Nima Cobeñas
 - o Instalaciones Sanitarias: Ing. Carlos Escate Alpas
 - o Instalaciones Eléctricas: Tc. Jesús Justo Rojas
- Capataz:
 - o Maestro de obra: Sr. Eduardo Vargas Rayme
 - o Encofrado: Sr. Miguel Huallpatueros
 - o Acero: Sr. Bonie Regalado Aguilar
 - o Instalaciones Sanitarias: Tc. Jorge Gutiérrez Aulla
 - o Instalaciones Eléctricas: Tc. Angel Honorio Portal

El contenido de la entrevista se dividió en 3 bloques. El primer bloque, se orientó para conocer la opinión de los participantes respecto a la reunión colaborativa de planificación apoyada en herramientas como planos 2D y cuadros de Excel. Para ello, se elaboró 5 preguntas cuya respuesta varía de acuerdo a la escala de Likert, desde el valor de 1 que es totalmente en desacuerdo hasta el valor de 5 que indica totalmente de acuerdo. Los últimos dos bloques se detallarán en el apartado 5.4.2.4.3.

5.4.2 Escenario 2

El presente escenario se desarrolló desde la construcción de elementos verticales del piso 02 hasta lo verticales del piso 06.

30-Ene	04-Feb	06-Feb	11-Feb	13-Feb	18-Feb	20-Feb	25-Feb	27-Feb	04-Mar
Semana 1		Semana 2		Semana 3		Semana 4		Semana 5	

Fig. 5.4.2.1 Cronograma - Escenario 2.
Fuente: Elaboración propia

Asimismo, se implementó los modelos virtuales BIM 3D&4D a la reunión de planificación. A continuación, se describe proceso de implementación gradual.

Tabla. 5.4.2.1 Descripción de la implementación de modelos BIM

	Descripción de la implementación BIM:
Semana 1: (Del 30/01 al 04/02)	<ul style="list-style-type: none"> ▣ Se presentó a través de dos laptops en la reunión de programación. ▣ Se desarrolló 1 escenario virtual para cada día.
Semana 2: (Del 06/02 al 11/02)	<ul style="list-style-type: none"> ▣ Se presentó a través de una pantalla grande en la reunión de programación. ▣ Se desarrolló 2 escenarios virtuales para cada día. ▣ Se envió por correo el álbum de imágenes a los subcontratistas.
Semana 3: (Del 13/02 al 18/02)	<ul style="list-style-type: none"> ▣ Se presentó una planificación previa al equipo técnico. ▣ Se presentó a los capataces la planificación aprobada por el equipo técnico a través de un panel de imágenes. ▣ Se presentó a través de una pantalla grande en la reunión de programación. ▣ Se desarrolló 2 escenarios virtuales para cada día. ▣ Se envió por correo el álbum de imágenes a los subcontratistas.
Semana 4: (Del 20/02 al 25/02)	<ul style="list-style-type: none"> ▣ Se presentó una planificación previa al equipo técnico. ▣ Se presentó a los capataces la planificación aprobada por el equipo técnico a través de un proyector. ▣ Se presentó a través de un proyector en la reunión de programación. ▣ Se desarrolló 2 escenarios virtuales para cada día. ▣ Se envió por correo el álbum de imágenes a los subcontratistas. ▣ Se entregó el álbum de imágenes a cada capataz.
Semana 5: (Del 27/02 al 04/03)	<ul style="list-style-type: none"> ▣ Similar a la semana 4.

Para el análisis cuantitativo, al término de cada semana, se evaluó el porcentaje de plan completado y se registró las causas de no cumplimiento. Por otro lado, para el análisis cualitativo, se realizó la entrevista semiestructurada para describir la eficiencia en la visualización y comunicación de las herramientas implementadas en las reuniones de planificación.

5.4.2.1 Modelo BIM 3D

El modelo 3D de la especialidad de estructuras, desarrollado por el tesista para el proyecto “Residencial La Gloria II”, cumple con el nivel de desarrollo propuesto para los elementos estructurales tales como cimientos, zapatas, columnas, vigas, losas macizas y losas aligeradas, así como para los elementos auxiliares como los paneles de encofrado, masas de logística, entre otros.

Tabla. 5.4.2.1.1 Elementos modelados según la propuesta del nivel de desarrollo.

Master Schedule					
Elemento	Nivel de desarrollo	¿Se modeló?	Elemento	Nivel de desarrollo	¿Se modeló?
Pared colindante	LOD 100	✗	Mixer	LOD 100	✓
Cerco perimétrico	LOD 100	✓	Terreno fragmentado	LOD 200	✓
Masas de logística	LOD 100	✓	Viga, Losa	LOD 300	✓
Grúa	LOD 100	✓	Muro, Placa, Columna	LOD 300	✓
Phase Schedule					
Elemento	Nivel de desarrollo	¿Se modeló?	Elemento	Nivel de desarrollo	¿Se modeló?
Terreno fragmentado	LOD 250	✓	Paneles tipo muro	LOD 350	✓
Viga, Losa	LOD 350	✓	Paneles tipo suelo	LOD 350	✓
Muro, Placa, Columna	LOD 350	✓	Paneles inclinado	LOD 350	✓
Lookahead					
Elemento	Nivel de desarrollo	¿Se modeló?	Elemento	Nivel de desarrollo	¿Se modeló?
Refuerzo de acero	LOD 100	✓	Apuntalado vertical	LOD 100	✓
Andamios	LOD 100	✓	Apuntalado horizontal	LOD 100	✓
Elementos tipo masa	LOD 100	✓	Elementos de accesibilidad	LOD 100	✓
Instalaciones genéricas	LOD 100	✓			

El modelo 3D contiene lo siguiente:

- Vistas 3D para cada nivel de elementos verticales y horizontales. Asimismo, los elementos auxiliares, en caso sea necesario, son ocultados mediante filtro, para mejorar la visualización de los elementos de concreto y de encofrado.
- Tablas de planificación de concreto de elementos verticales y horizontales por piso y ordenado en sectores.
- Tablas de planificación de encofrado de elementos verticales y horizontales.

A continuación, se presenta el modelo 3D del proyecto Residencial La Gloria II con y sin elementos auxiliares

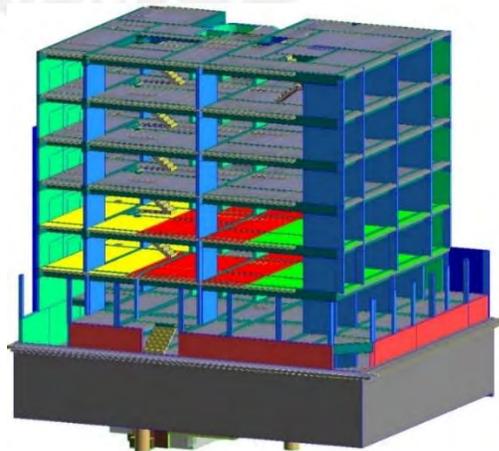


Fig. 5.4.2.1.1 Modelo con información virtual de la especialidad de Estructuras.
Fuente: Elaboración propia

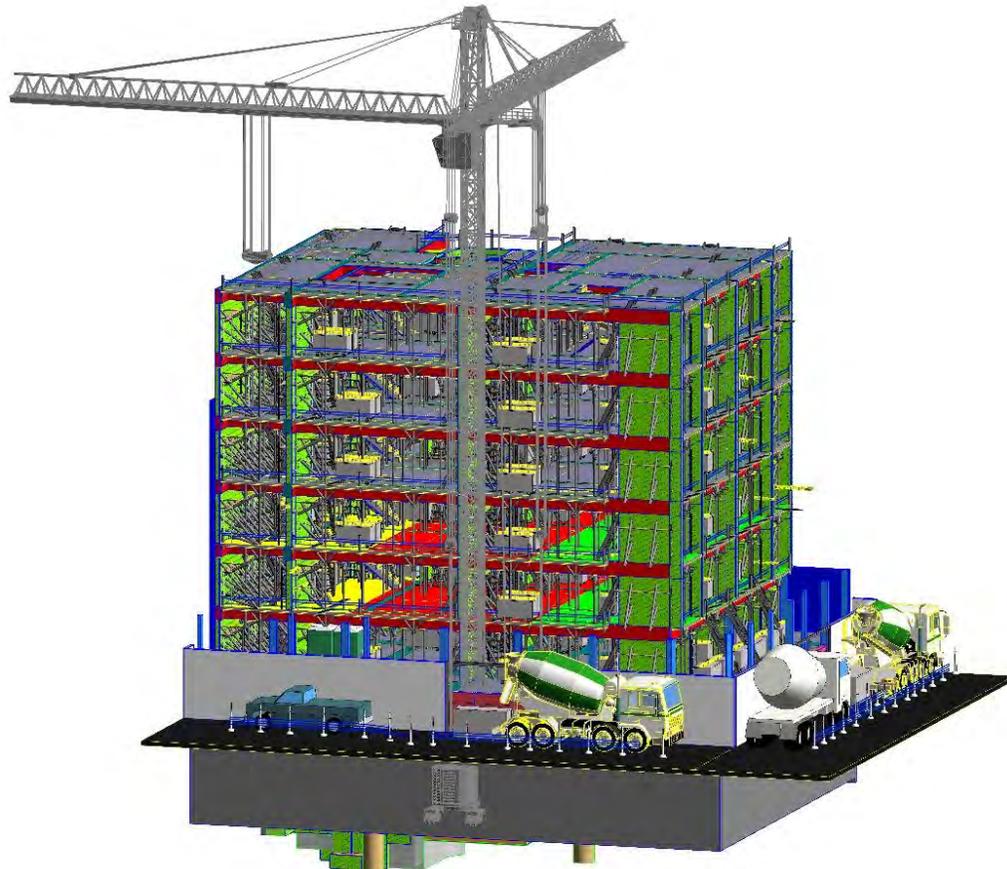


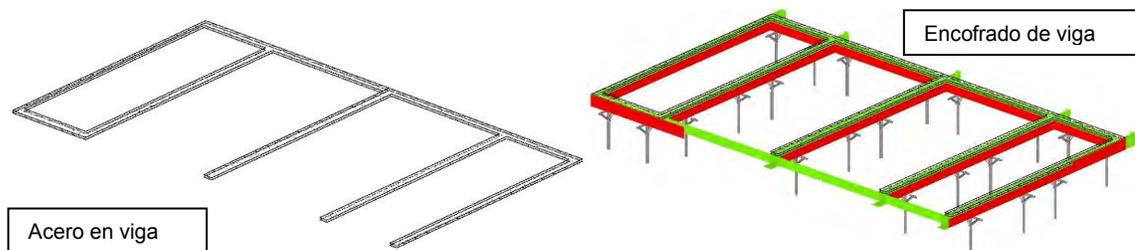
Fig. 5.4.2.1.2 Modelo con información virtual con elementos auxiliares.
Fuente: Elaboración propia

5.4.2.2 Modelo BIM 4D

El modelo 4D de la especialidad de estructuras se desarrolló en base al modelo 3D y al cronograma de actividades que se realizó manualmente en el software Navisworks. Asimismo, se adaptó al desglose de tareas realizado por la empresa constructora.

A continuación, se muestra el proceso de construcción de elementos verticales, horizontales y escaleras:

Elementos horizontales:



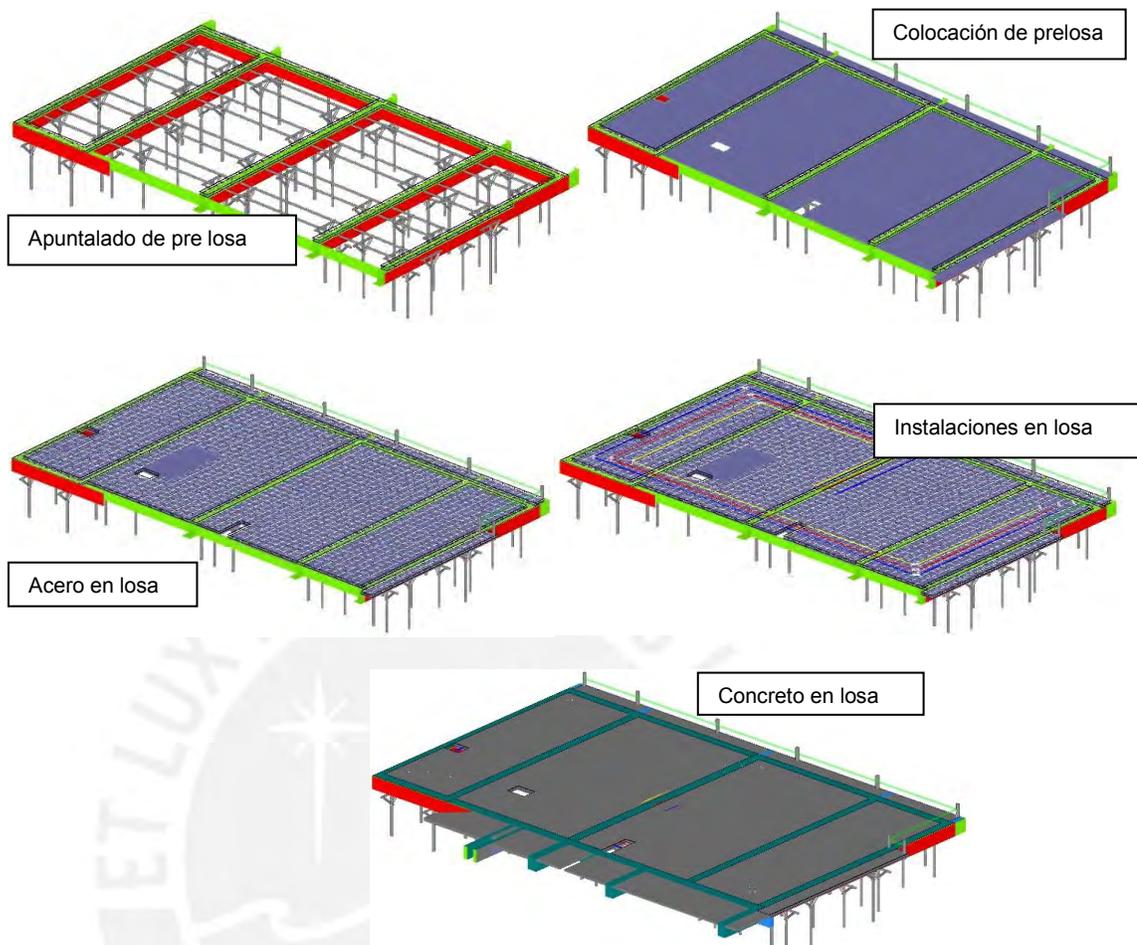
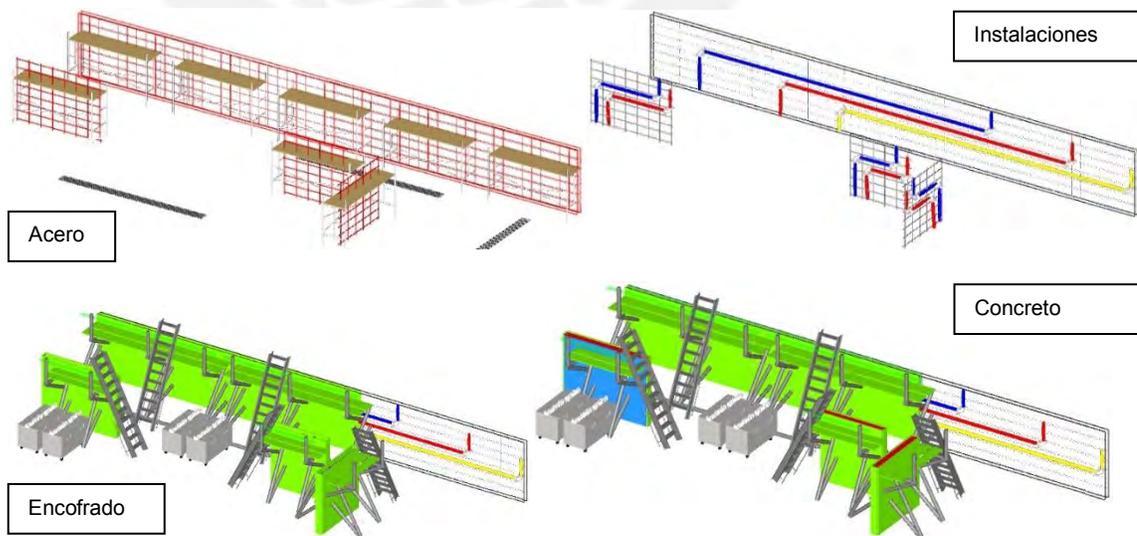


Fig. 5.4.2.2.1 Secuencia de operaciones en elementos horizontales.
Fuente: Elaboración propia adaptado al proyecto RLGII

Elementos verticales:



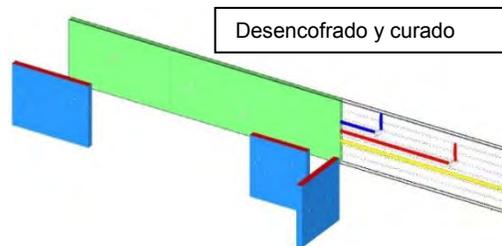


Fig. 5.4.2.2.2 Secuencia de operaciones en elementos verticales.
Fuente: Elaboración propia adaptado al proyecto RLGII

Escaleras:

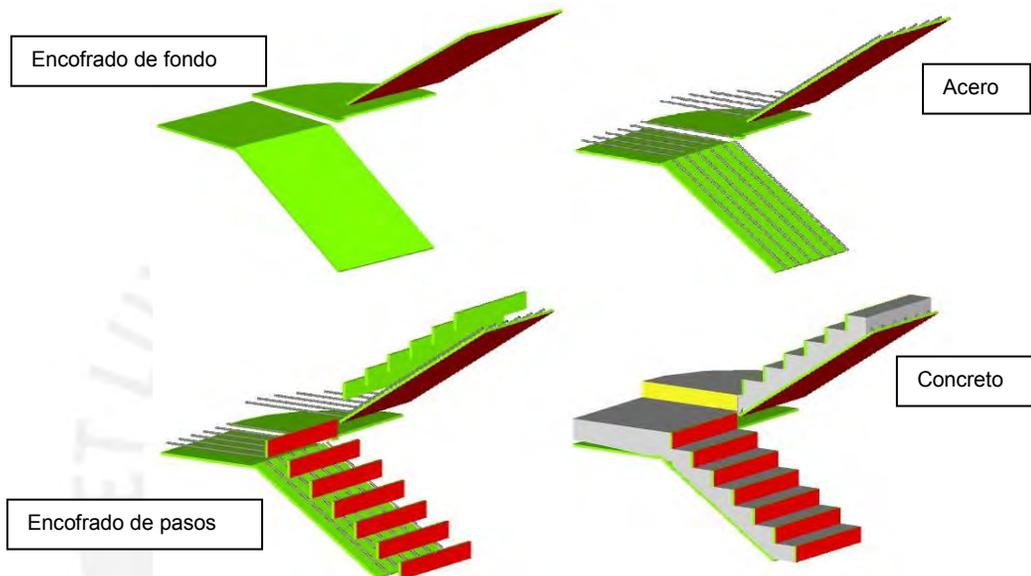


Fig. 5.4.2.2.3 Secuencia de operaciones en escaleras.
Fuente: Elaboración propia adaptado al proyecto RLGII

5.4.2.3 Planificación semanal

La reunión de planificación se realizaba los días viernes, de 10am a 12pm y se desarrolló en las fechas siguientes:

Fecha de reunión de planificación		
	Subcontratistas	Capataces
Semana 1	27/01/2017	--
Semana 2	03/02/2017	--
Semana 3	10/02/2017	09/02/2017
Semana 4	17/02/2017	16/02/2017
Semana 5	24/02/2017	23/02/2017

Fig. 5.4.2.3.1 Fecha de reuniones – Escenario 2.
Fuente: Elaboración propia.

En la presente etapa, se conservó la reunión de planificación entre el contratista y los representantes de cada subcontrata. Por ello, se implementó la reunión con los capataces, a fin de que el último planificador participe y conozca la programación semanal y se realizó los días jueves. En ambas reuniones, se presentó dos

planificaciones por día, mañana y tarde, a fin de mostrar una secuencia clara y ordenada de las operaciones a realizar.

La agenda de la reunión, con los subcontratistas, fue el siguiente:

- Informar el PPC y dialogar las CNC.
- Aportes/Comentarios de los presentes.
- Presentación de la programación semanal con modelos virtuales.



Fig. 5.4.2.3.2 Reunión de planificación semanal con el modelo virtual.
Fuente: Elaboración propia

La dinámica de la reunión fue el siguiente:

- Se contabilizó las tareas completadas hasta el día jueves y se obtuvo un PPC parcial, pues faltaba el avance del día viernes y sábado. En base a ello, se actualizó el modelo virtual y se predijo las tareas a completar hasta el sábado.
- El tesista presentó una posible programación semanal con el modelo 4D. Luego, el ingeniero residente o ingeniero de campo otorgó su visto bueno.
- El día jueves, se presentó la posible programación semanal a los capataces y se analizó la viabilidad de las tareas a planificar.

A continuación, se muestra y se describe el layout de las reuniones con los capataces:

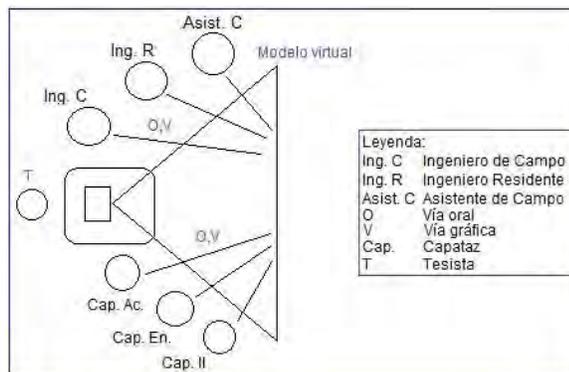


Fig. 5.4.2.3.3 Layout de reunión de planificación con los capataces.
Fuente: Elaboración propia

Se reúnen el equipo contratista, los capataces asistentes y el tesista enfrente del modelo virtual proyectado a través de un proyector. Luego, el tesista presentó la programación de manera oral y gráfica. Finalmente, los involucrados interactuaron y se actualizó el modelo 4D.

- El día viernes, se planificó junto a los subcontratistas y se siguió la agenda detallada.
A continuación, se muestra el resumen de las tareas no completadas y la programación semanal.



Fig. 5.4.2.3.4 Presentación de tareas no completadas y PPC.
Fuente: Elaboración propia

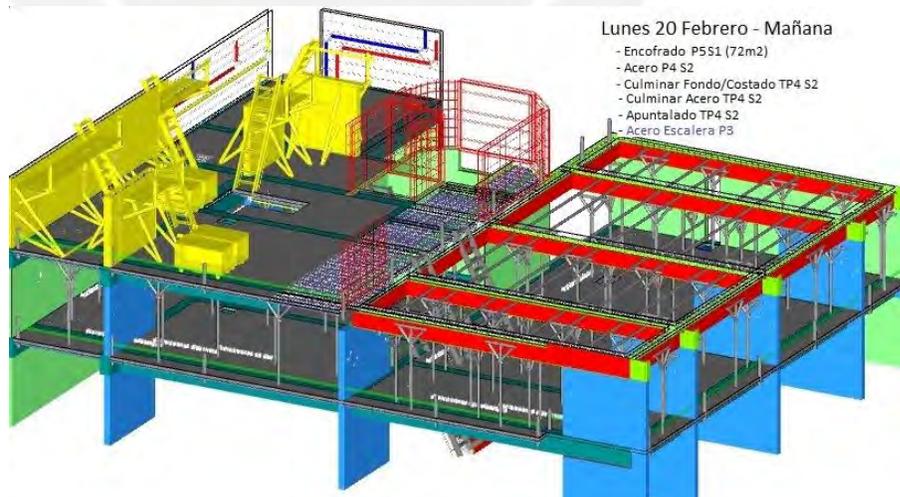


Fig. 5.4.2.3.5 Presentación de la programación semanal.
Fuente: Elaboración propia

- El resultado de la reunión de planificación fue detallado en un cuadro de Excel, elaborado por el equipo contratista, y en un álbum de actividades planificadas, elaborado por el tesista. Finalmente, se informó a los capataces.



Fig. 5.4.2.3.6 Presentación de la programación semanal al personal.
Fuente: Elaboración propia

A continuación, se resume la dinámica de cada reunión de planificación.

Tabla. 5.4.2.3.1 Dinámica de la reunión de la planificación – Escenario 2.

	LPS		4D
Previo a la reunión	Se contabiliza las actividades completadas para obtener el PPC.	<-->	Se actualiza el modelo para mostrar el avance real y se simula el avance hasta el día sábado
	Se prepara una programación semanal tentativa	<-->	Se realiza el modelo 4D de la programación tentativa.
	El ingeniero de campo o ingeniero residente revisa la programación	<-->	El ingeniero de campo o ingeniero residente revisa el modelo 4D
Reunión con capataz	Se presenta la programación semanal tentativa para la siguiente semana.	+	Se muestra el modelo 4D de la programación tentativa.
	Se analiza la factibilidad de las tareas junto al capataz	-->	Se modifica el modelo 4D en base a las observaciones
Reunión con subcontratista	Se informa el PPC y las actividades no completadas.	+	Se muestran imágenes comparativas entre trabajo planificado y trabajo ejecutado.
	Se presenta la programación semanal tentativa para la siguiente semana.	+	Se muestra el modelo 4D de la programación tentativa.
	Se analiza la factibilidad de las tareas junto los subcontratistas	-->	Se modifica el modelo 4D en base a las observaciones
Post - reunión	Se adquieren compromisos y se obtiene la programación semanal	-->	Se envía correo con la programación a los subcontratistas y se otorga el álbum de imágenes a los capataces.

Fuente: Adaptado de Olguín (2011)

5.4.2.4 Medición de indicadores cuantitativos y cualitativos

5.4.2.4.1 Porcentaje de Plan Completado

Las consideraciones realizadas para medir esta métrica fue igual que en el escenario 1.

5.4.2.4.2 Causas de No Cumplimiento

Se consideró el mismo catálogo que en el escenario 1.

5.4.2.4.3 Task Made Ready

El esquema utilizado para la medición de esta métrica fue igual que en el escenario 1.

5.4.2.4.4 Task Anticipated

Se consideró el mismo esquema que en el escenario 1.

5.4.2.4.5 Entrevista semiestructurada

La entrevista se aplicó a los mismos participantes del escenario 1 y el primer bloque se describió en el punto 5.4.1.2.5.

El segundo bloque, se orientó para conocer la opinión de los participantes respecto a la reunión colaborativa implementada con el modelo virtual, el cual incluía elementos auxiliares y dos gráficos por día. Para ello se plantearon 8 preguntas, cuya respuesta varía en la escala de Likert, donde el valor de 1 es totalmente en desacuerdo hasta el valor de 5, totalmente de acuerdo. Finalmente, el tercer bloque fue preguntas de opinión libre.

5.4.3 Limitaciones

Durante el desarrollo del caso de estudio, surgieron las limitaciones siguientes:

- Acceso del investigador a los documentos de planificación de la empresa constructora durante el desarrollo del primer escenario.
- El nivel de implementación del Last Planner System en la empresa contratista es inadecuada para la implementación de los modelos virtuales BIM, pues la reunión de planificación semanal se realiza entre el equipo contratista y los subcontratistas, que no son los que están en campo de manera permanente.
- El alto grado de subcontratación debilita el compromiso entre los constructores del proyecto.
- El tiempo que dona el capataz para la reunión con los capataces es voluntario, pues no se estipula en el contrato entre contratista y subcontratista. Por ello, la reunión fue en distintos horarios con cada uno de ellos.
- Problemas de logística, pues en el proyecto de investigación no cuenta con proyector.
- Existen problemas externos, propios del caso de estudio, que influyeron en los resultados.
- La responsabilidad de informar la programación al personal no es asumida de manera correcta por algunos subcontratistas.

CAPÍTULO 6: ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 Análisis del flujo de comunicación

Se detalla el flujo de comunicación de la planificación de ambos escenarios, desde los contratistas hasta el personal obrero.

Escenario 1:

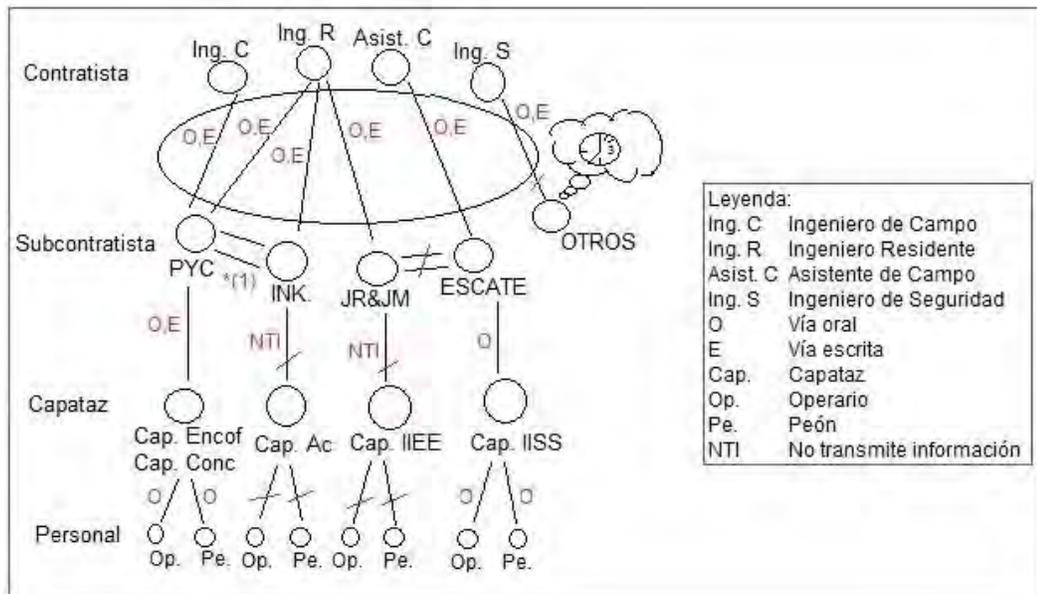


Fig. 6.1.1 Flujo de transmisión de la planificación - Escenario 1.
Fuente: Elaboración propia

Los contratistas se encargaban de preparar las tareas que se podrían realizar durante la semana. Sin embargo, pocas veces se reunieron por falta de tiempo.

El día de la reunión de planificación, los contratistas emitieron la información a los subcontratistas vía oral y vía escrita, mediante en cuadros de Excel. Luego, generalmente, los subcontratistas no presentaban ninguna objeción para el cumplimiento de las tareas planteadas.

Durante la reunión, la atención de los planificadores no se focalizaba en la presentación de la tarea a planificar sino existieron diálogos particulares entre ellos.

Al término de la reunión, un subcontratista transmitió la información a su capataz de manera oral y escrita, otro de manera oral y dos subcontratistas no transmitieron la información a los capataces. Luego, los capataces, que recibieron la información, transmitieron lo que comprendieron por vía oral a los operarios y peones y, finalmente,

los capataces que no recibieron ninguna indicación planificaban diariamente junto al asistente de campo.

En síntesis, en el tramo final del LPS, se da una aplicación Lean aparente. Pues, la información transmitida por parte del equipo contratista a los constructores no es la óptima, ya que posee intermediarios. Los constructores junto al grupo contratista continúan planificando de manera usual, es decir, las tareas a realizar se dan conforme se van abriendo los frentes de trabajo en cada partida.

Escenario 2:

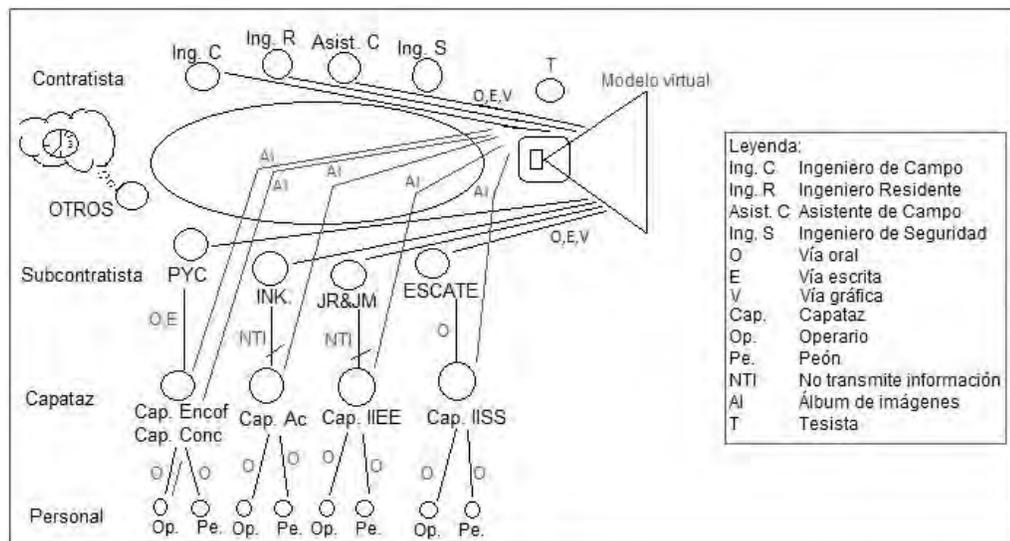


Fig. 6.1.2 Flujo de comunicación de la planificación - Escenario 2.
Fuente: Elaboración propia

El día de la reunión de planificación, los contratistas emitieron la información a los subcontratistas vía oral, vía escrita y vía gráficos. Durante la reunión, la atención de los planificadores se focalizó en la presentación de las tareas a través del modelo virtual; sin embargo, aún existían diálogos particulares entre algunos de ellos.

Asimismo, en la presentación de las tareas programadas, se motivó al diálogo con los subcontratistas a través de consultas directas a los participantes, por ejemplo, se formuló las siguientes preguntas ¿usted cree factible que se puede realizar esta tarea en el tiempo previsto?, ¿hay suficiente mano de obra, material?, entre otros.

Al término de la reunión, el modo de transmisión de la tarea por parte de los subcontratistas a los capataces se mantuvo igual que en el escenario 1; sin embargo, se creó otra línea de transmisión que fue a través del tesista, quién se reunió con cada

capataz, con el objetivo de informar y detallar el trabajo planificado, y el capataz transmitió la programación de manera oral al operario y peón.

6.2 Análisis de PPC y CNC

El promedio obtenido de porcentaje de plan completado, en el escenario 1, fue 66%.

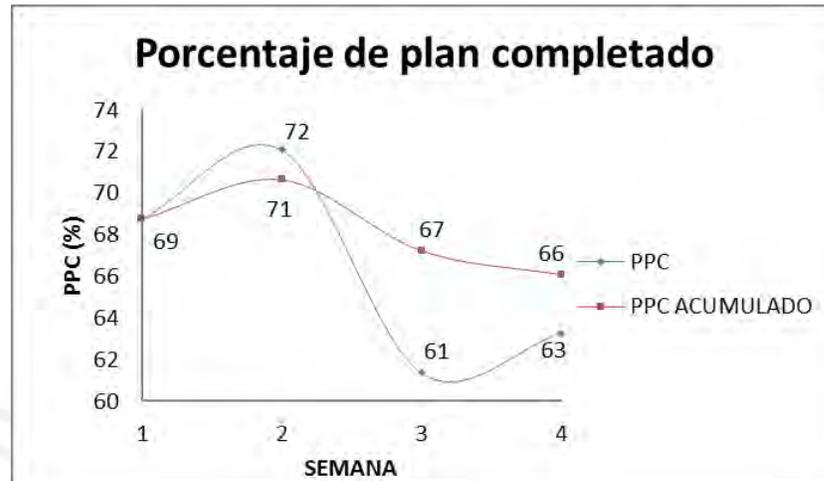


Fig. 6.2.1 PPC del proyecto – Escenario 1.
Fuente: Elaboración propia

El promedio obtenido de porcentaje de plan completado, en el escenario 2, fue 71%.

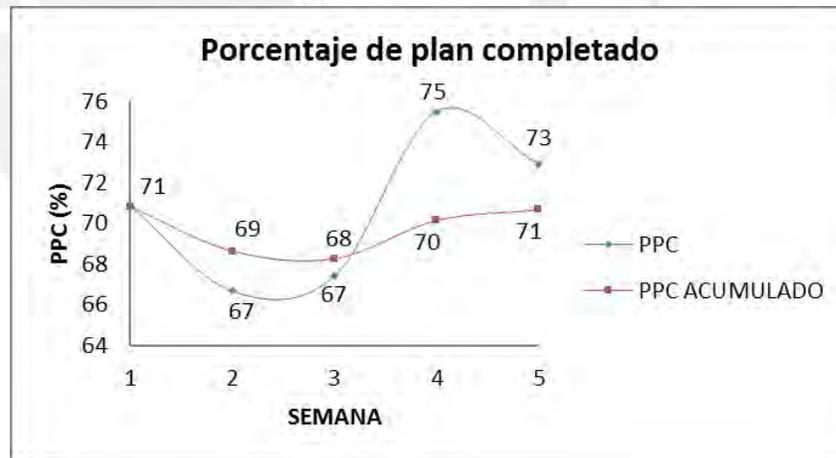


Fig. 6.2.2 PPC del proyecto – Escenario 2.
Fuente: Elaboración propia

El PPC promedio del escenario 2 fue ligeramente superior al PPC del escenario 1, pues varía 5.0%. Ello indica que la confiabilidad de la programación se mantuvo indiferente frente a la implementación del modelo virtual; sin embargo, la curva de aprendizaje en el equipo técnico mejoró en las 3 últimas semanas. Por ejemplo, en vista de los problemas observados en el escenario 1, se modificó la sectorización de verticales de 3 sectores a 4 sectores.

Si bien es cierto que los capataces fueron involucrados en la planificación de tareas, los operarios y peones no fueron partícipes del compromiso semanal, por ello, la planificación no se transmitió de manera adecuada a los constructores finales. Las personas por encima de los capataces generaban un compromiso aparente frente a las herramientas implementadas, y las personas por debajo de los capataces aún trabajaban de manera tradicional, es decir, trabajan conforme se generaba frentes de trabajo, salvo el *imput* de la nueva sectorización de verticales que fue impuesta al grupo de encofrado.

Además del problema general de comunicación del proyecto, existen múltiples factores que afectaron de sobre manera el escenario 2 en comparación al escenario 1. Entre los cuales se encuentra lo siguiente:

- ✓ Hubo problemas con el proveedor Concremix, pues suspendió el abastecimiento de concreto premezclado por problemas en planta en dos oportunidades.
- ✓ El problema económico con los trabajadores de acero y encofrado se agravó. En consecuencia, las empresas subcontratadas presentaban una alta ausencia del personal, siendo el caso más crítico la partida de acero, pues en la primera oportunidad se retiraron 6 de 13 personas, incluido el capataz. En una segunda oportunidad, el subcontratista incorporó 5 personas, pero al término de 1 semana se retiraron. De manera similar, se retiraron 3 carpinteros en una semana. Ello repercutió en el proyecto, pues ambas partidas son de vital importancia para el adecuado flujo de actividades de las demás partidas.
- ✓ Se presentó cambios a última hora en la partida de instalaciones sanitarias y eléctricas en el techo del piso 05, que fue solicitada por el dueño del departamento. Ello retraso la instalación de tuberías de las diferentes especialidades, por ende, se retrasaron las actividades posteriores.

6.3 Análisis de Frecuencia de Causas de No Cumplimiento

Las causas de no cumplimiento identificadas en el escenario 1 fueron los siguientes:

ANÁLISIS DE INCUMPLIMIENTO ACUMULADO									
SEMANAS	PROGRAMACIÓN	LOGÍSTICA	EJECUCIÓN	TRABAJO PRE REQUISITO	CLIENTE	SUBCONTRATAS	EQUIPOS	ADMINISTRATIVOS	EXTERNO
Semana 1	1			5		4			
Semana 2	1			6		5			
Semana 3	2		2	8		5			
Semana 4	3			9		5		1	
Acumulado	7	0	2	28	0	19	0	1	0

Fig. 6.3.1 CNC acumulado – Escenario 1.
Fuente: Elaboración propia

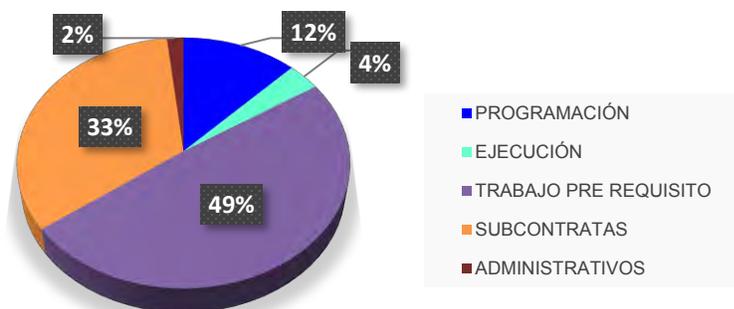


Fig. 6.3.2 Cuadro estadístico de CNC – Escenario 1.
Fuente: Elaboración propia

Las causas de no cumplimiento identificadas en el escenario 2 fueron las siguientes:

ANÁLISIS DE INCUMPLIMIENTO ACUMULADO									
SEMANAS	PROGRAMACIÓN	LOGÍSTICA	EJECUCIÓN	TRABAJO PRE REQUISITO	CLIENTE	SUBCONTRATAS	EQUIPOS	ADMINISTRATIVOS	EXTERNO
Semana 1				8		5		1	
Semana 2	3			11		4			
Semana 3	5	1		3		6			
Semana 4				6		5			2
Semana 5				3	5	5			
Acumulado	8	1	0	31	5	25	0	1	2

Fig. 6.3.3 CNC acumulado – Escenario 2.
Fuente: Elaboración propia

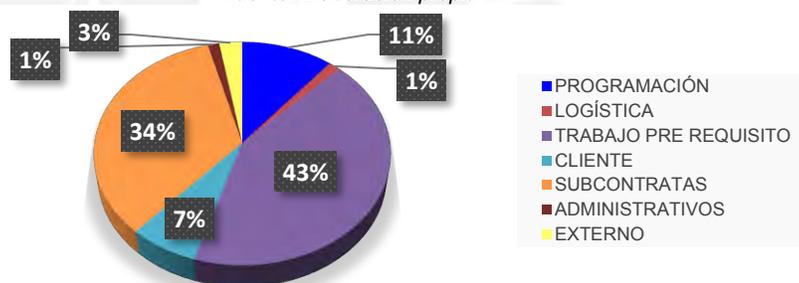


Fig. 6.3.4 Cuadro estadístico de CNC – Escenario 2.
Fuente: Elaboración propia

En ambos escenarios predominan los errores de los subcontratas, trabajo pre requisitos y de programación.

El error de subcontrata se generó por la inestabilidad de sus trabajadores que se dio en la partida de acero y de encofrado. En consecuencia, se obtuvo una baja producción, así como, se perdió el aprendizaje continuo del grupo, dado que el personal que ingresa demora en adaptarse al ámbito de trabajo.

El error de trabajo pre requisito fue a causa del retraso de la partida proveedor con la partida cliente, ya sea por un exceso de metrado o por la ausencia de trabajadores. Este error tiene su origen en el error de subcontrata, donde la responsabilidad es compartida por varias subcontratistas, dado que el atraso de una partida perjudica a las que siguen en el tren de actividades y el error de programación, pues la escasa participación de los contratistas y subcontratistas no permitió identificar restricciones.

El error de programación fue debido a la inadecuada utilización de la herramienta *Last Planner*, dado que se impone el trabajo a ejecutar y el subcontratista, en la mayoría de casos, es un receptor pasivo. En el primer escenario, se programó tareas cuyo metrado requería un mayor personal, dado que raras veces faltaban los operarios y peones y aun así no se concluían el trabajo a tiempo. En el segundo escenario, se dimensionó adecuadamente las tareas, pero el personal en campo se ausentó con mayor frecuencia. En el escenario 2, se generó la causa de no cumplimiento ocasionada por el cliente y por el proveedor, ello se describe al final del punto 6.2.

El resultado está ligado al grado de compromiso que existe entre todos los involucrados del proyecto, al uso adecuado de las herramientas de planificación y el grado de dinamismo en la reunión de planificación, es decir, la alta participación de los planificadores que deberían ser los capataces y/o operarios junto al equipo técnico.

6.4 Análisis de *Task Made Ready*

En el escenario 1, el promedio obtenido de TMR fue 0.55. Asimismo, en el escenario 2, el promedio fue 0.59

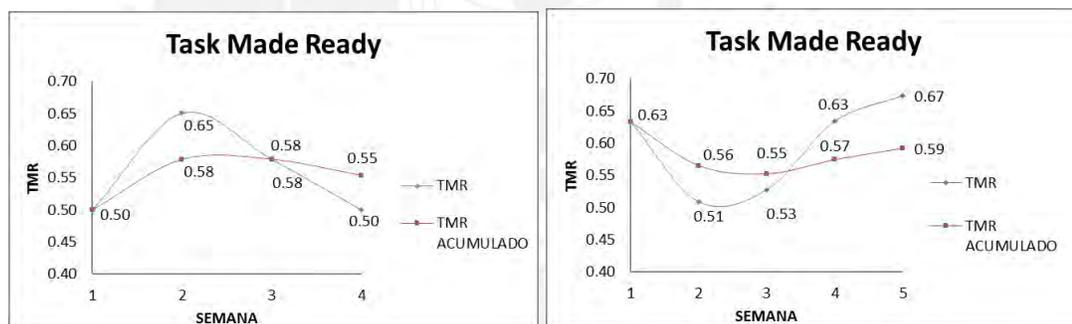


Fig. 6.4.1 TMR del proyecto – Escenario 1 y Escenario 2.
Fuente: Elaboración propia

El TMR del escenario 2 fue ligeramente superior al TMR del escenario 1, tan solo varía 7%. Ello indica que la implementación del modelo virtual no fue determinante en la preparación de las tareas. Sin embargo, el TMR de las dos últimas semanas del escenario 2 mejoró, dado que, la visualización de las tareas permitió reducir el ritmo de producción del proyecto, pues no contaba con los recursos necesarios para ejecutar las tareas planificadas. Por ello, se redujo la cantidad de tareas planificadas una semana antes pero que no se llegaron a programar en la semana posterior.

Además, la no realización de las tareas programadas, en el escenario 2, se debe a las altas rotaciones y deserciones del personal.

6.5 Análisis de *Task Anticipated*

En el escenario 1, el promedio de TA obtenido fue 0.58 en TA mín y 0.92 en TA máx.

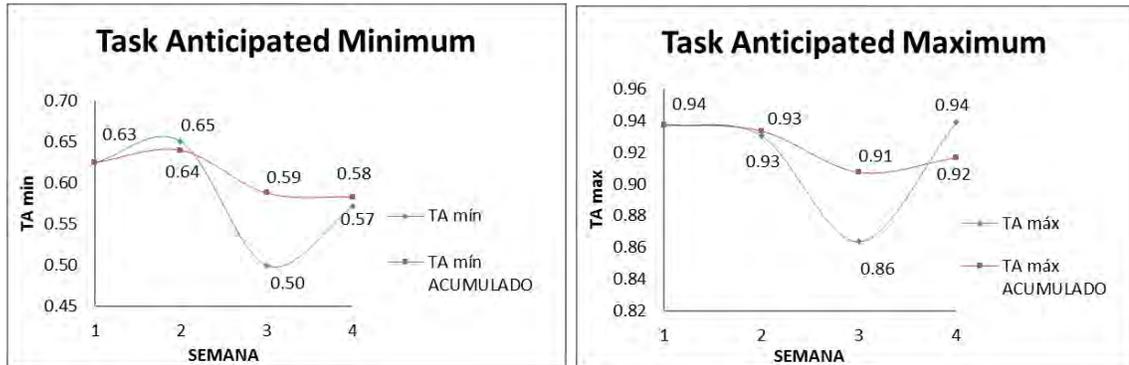


Fig. 6.5.1 TA mín – TA máx – Escenario 1.
Fuente: Elaboración propia

En el escenario 2, el promedio de TA obtenido fue 0.65 en TA mín y 0.94 en TA máx.

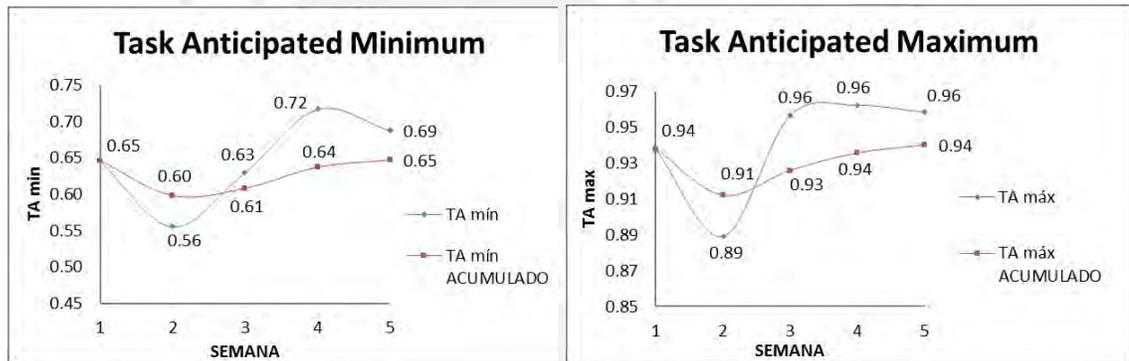


Fig. 6.5.2 TA mín – TA máx – Escenario 2.
Fuente: Elaboración propia

El TA mín del escenario 2 mejoró en un 12% respecto al TA mín del escenario 1; y, el TA máx del escenario 2 mejoró en un 2% respecto al TA máx del escenario 1. Ambas mejoras son mínimas, puesto que en el proyecto las tareas nuevas no planificadas consistían en el curado de elementos horizontales y desencofrado y curado de las escaleras.

El TA mín fue afectado por las causas de no cumplimiento ya mencionados; sin embargo, en el escenario 2, este indicador mejoró, pues aumentó el porcentaje de tareas anticipadas completadas.

El TA máx fue cercano al valor de uno. De ello se desprende que, el proyecto programó una cantidad mínima de tareas nuevas, lo cual es coherente, ya que la obra se encontraba en el casco estructural del 2do piso en adelante y estas tareas son típicas.

6.6 Análisis de entrevista semiestructurada

Debido a que, la muestra en ambos escenarios es reducida, entonces el análisis presentado muestra una tendencia de la percepción de cada grupo de trabajo respecto a la problemática planteada.

El resultado obtenido en los distintos grupos, en el escenario 1, fue el siguiente:

- Contratista

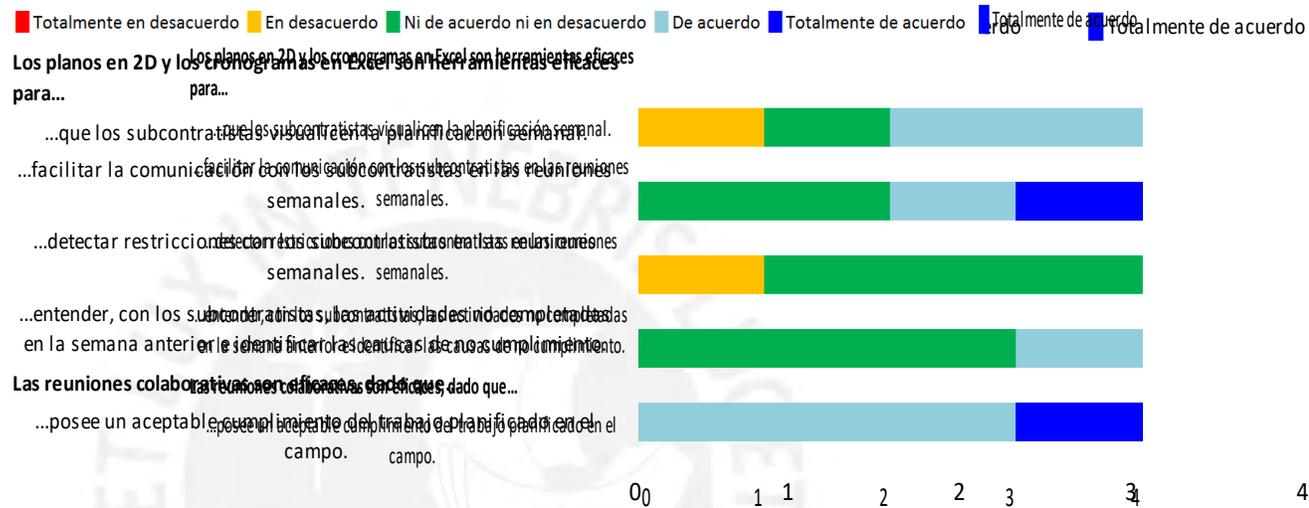


Fig. 6.6.1 Resultados de entrevista a los contratistas – Escenario 1.
Fuente: Elaboración propia

- Subcontratista

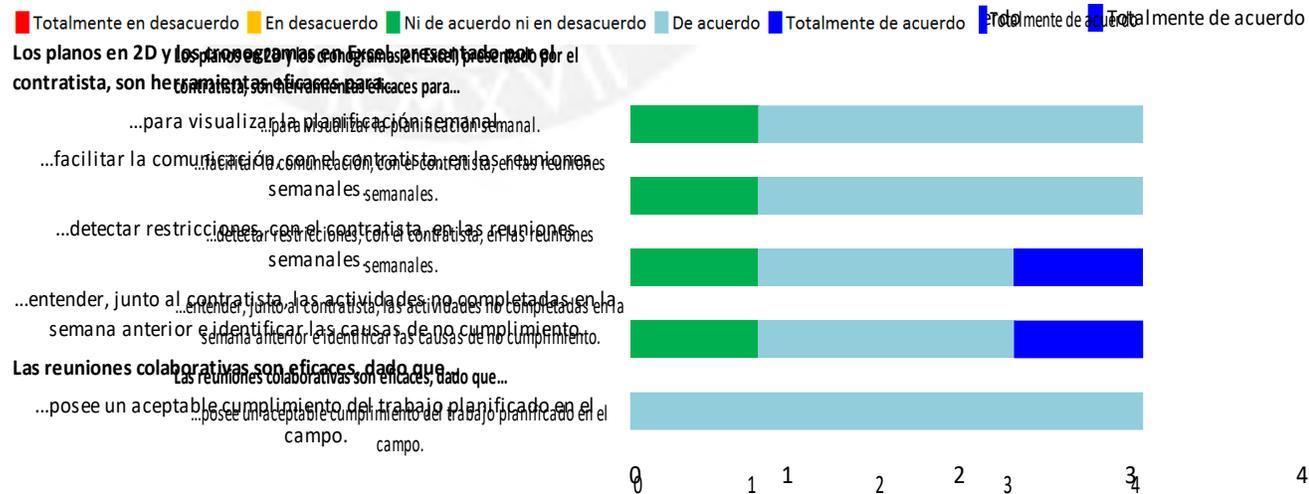


Fig. 6.6.2 Resultados de entrevista a los subcontratistas – Escenario 1.
Fuente: Elaboración propia

- Capataz

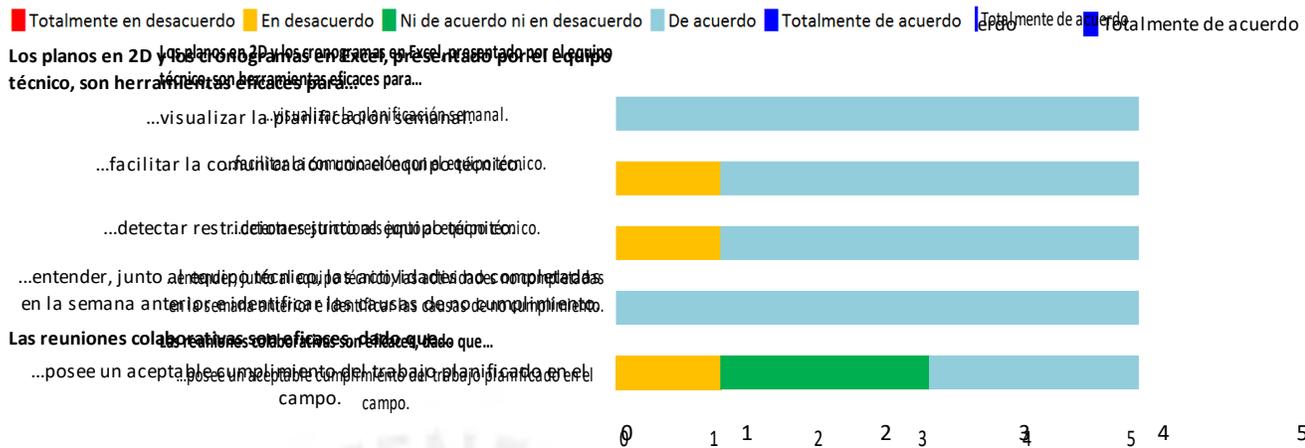


Fig. 6.6.3 Resultados de entrevista a los capataces – Escenario 1.

Fuente: Elaboración propia

Respecto a la visualización, la mitad de los contratistas admitieron que la herramienta permite ver planificación semanal; sin embargo, el grupo compuesto por el Ing. Residente y el Ing. de Campo, que son los principales planificadores, se mantuvieron indiferentes y en desacuerdo con la eficacia de esta herramienta. El grupo de los subcontratistas, en su mayoría, manifestaron que la herramienta es adecuada, lo cual se debe a su experiencia en trabajos con planos 2D. Finalmente, en el tercer grupo, todos los capataces declararon estar de acuerdo con las herramientas 2D.

Respecto a la comunicación, por un lado, los contratistas manifestaron estar de acuerdo con que la herramienta facilita la comunicación en la reunión de planificación, salvo dos integrantes que mencionaron estar indiferentes. No obstante, la comunicación fue confundida entre una conversación habitual de una reunión y la comunicación focalizada en las tareas de planificación. Por otro lado, los subcontratistas y capataces declararon estar de acuerdo con la herramienta. Es importante aclarar, que los capataces habitualmente conversan con el Ing. de campo o asistente de campo sobre planos 2D y consideran que esta herramienta es eficaz para sus propósitos.

Respecto a la detección de restricciones, la Ing. de campo mencionó estar en desacuerdo con la herramienta y el equipo restante se mantuvo indiferente. Sin embargo, la apreciación del grupo subcontratista y de los capataces difieren del grupo contratista, pues admiten que la herramienta ayuda a detectar restricciones; sin embargo, ello no se reflejó en el campo de trabajo.

Respecto a la comprensión de las tareas no completadas, el grupo contratista consideró estar indiferente ante la herramienta habitual, pues en la reunión de planificación esta

sección solo fue mencionada por el equipo contratista y no se profundizó sobre la causa de incumplimiento. Pero, el grupo subcontratista y los capataces manifestaron que la herramienta es útil para entender las actividades no completadas y las causas de no cumplimiento; sin embargo, incurrieron en los mismos problemas.

Por último, respecto a la eficacia de la reunión, el grupo contratista, subcontratista y capataz consideraron estar de acuerdo, salvo 3 integrantes del grupo capataz que manifestaron estar indiferentes y en desacuerdo. Sin embargo, el porcentaje de plan completado indica que dicha reunión no es eficaz por dos razones. En primer lugar, porque la programación no fue transmitida de manera adecuada hasta último planificador y constructor y, en segundo lugar, porque fue utilizado como un medio de información en lugar de permitir que los participantes planifiquen de manera colaborativa.

En la variedad de respuestas ante las distintas problemáticas planteadas, influye el nivel de instrucción de cada grupo. Siendo el grupo de contratista de mayor criterio crítico, seguido del grupo subcontratista, que presentaba un adecuado grado académico. Dado que, ambos grupos aún reconocen inconvenientes, entonces indica que las herramientas habituales del *Last Planner System* deben ser mejoradas.

El resultado obtenido en el escenario 2 fue el siguiente:

- Contratista

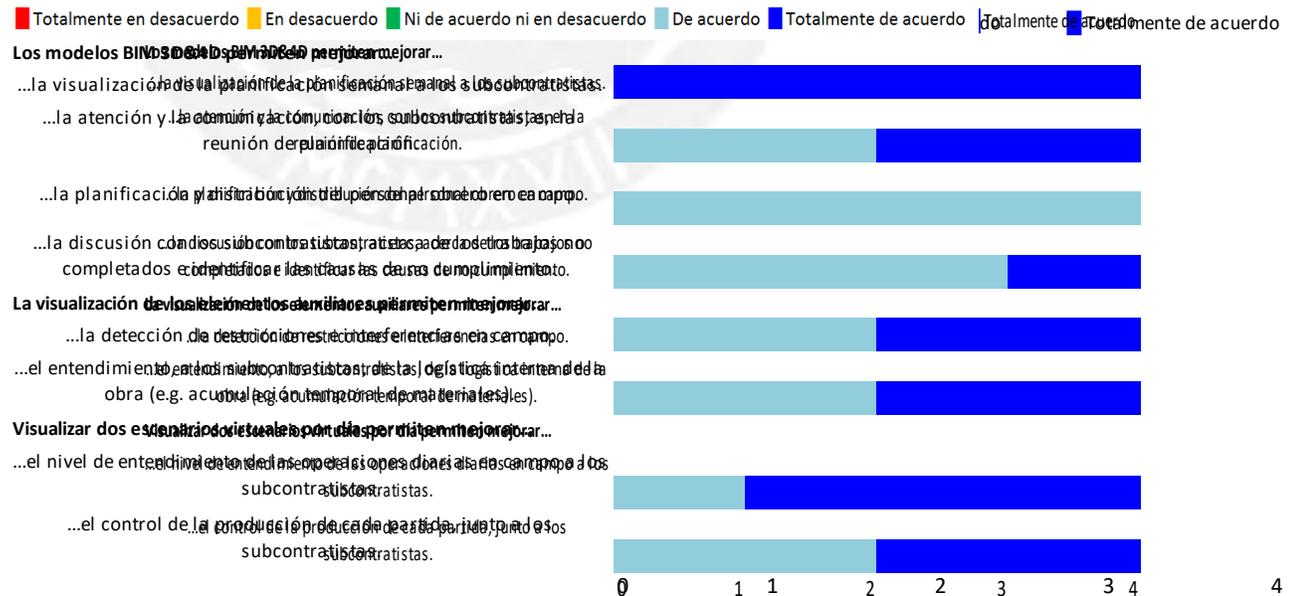


Fig. 6.6.4 Resultados de entrevista a los contratistas – Escenario 2.

Fuente: Elaboración propia

- Subcontratista

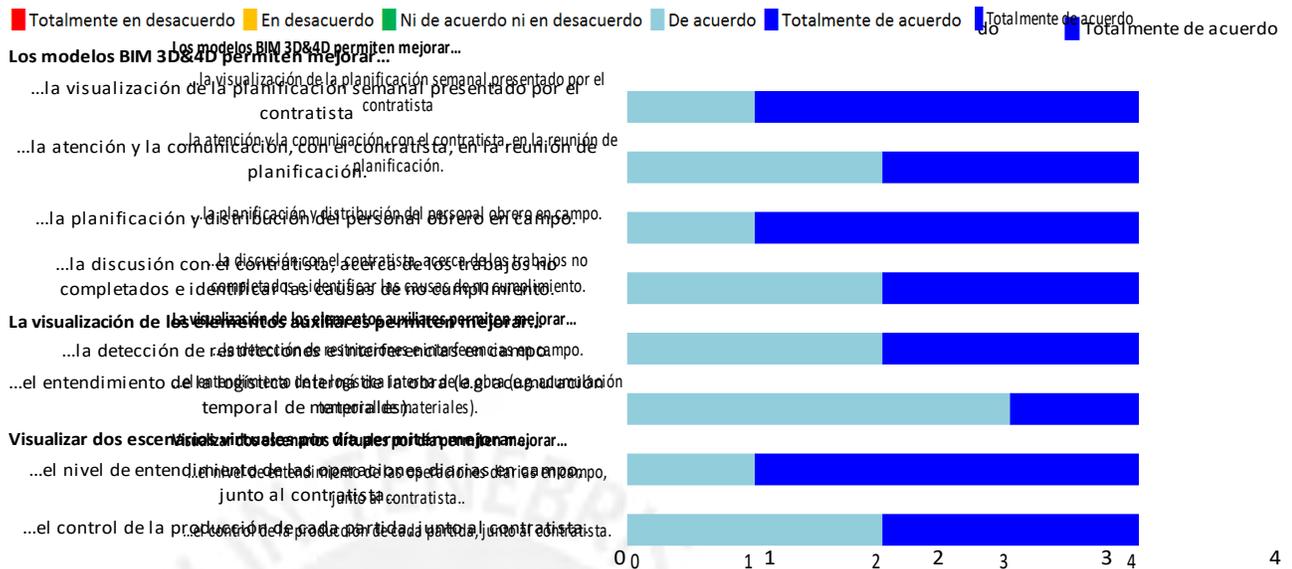


Fig. 6.6.5 Resultados de entrevista a los subcontratistas – Escenario 2.
Fuente: Elaboración propia

- Capataz

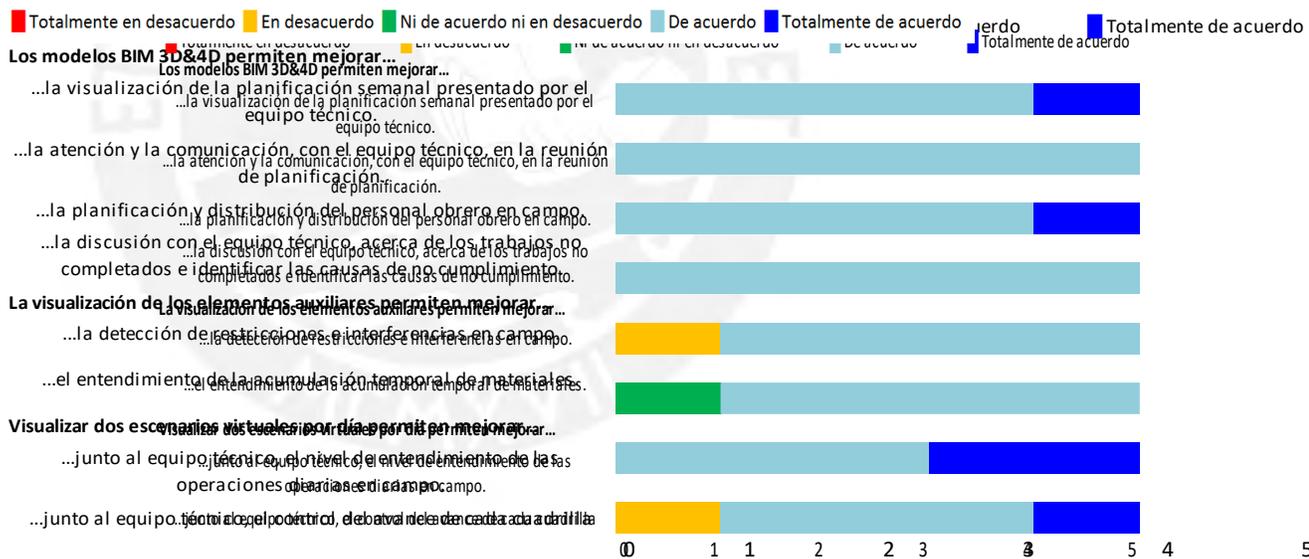


Fig. 6.6.6 Resultados de entrevista a los capataces – Escenario 2.
Fuente: Elaboración propia

Respecto a la visualización, el grupo contratista manifestó estar totalmente de acuerdo con el modelo virtual. Asimismo, la mayoría de los subcontratistas consideraron estar totalmente de acuerdo con la herramienta implementada. Además, los capataces admitieron estar de acuerdo con que el modelo BIM mejore la visualización de las tareas. Ello se corroboró en las reuniones de pre-planificación entre el equipo técnico y los capataces, pues al ver la secuencia de tareas los participantes interactuaban e identificaban restricciones de trabajo y se estableció medidas correctivas.

Respecto a la comunicación, el grupo contratista y subcontratista asintieron estar entre totalmente de acuerdo y de acuerdo con la herramienta BIM, y el grupo capataz consideró estar de acuerdo con la herramienta para facilitar la comunicación. Además, el tesista interactuó con los participantes y focalizó la atención de los mismos en la presentación de la planificación, a fin de comprometerlos con el cumplimiento las tareas.

Respecto a la planificación y distribución del personal obrero, el grupo contratista manifestó estar de acuerdo con la herramienta, incluso un integrante comentó que el modelo virtual ayudaría en la distribución de trabajos al personal. El grupo subcontratista, en su mayoría, estuvieron totalmente de acuerdo con la herramienta, pues son ellos quienes finalmente transmiten el mensaje a los capataces y operarios y así, se evitaría otorgar indicaciones que probablemente se interpretaría de manera ambigua. Finalmente, el grupo de capataces admitieron estar de acuerdo; sin embargo, mantenían la forma tradicional de distribuir al personal en campo.

Respecto a la discusión sobre los trabajos no completados, el grupo contratista, subcontratista y capataz manifestaron estar de acuerdo con la utilidad de la herramienta virtual. Además, en el presente escenario la principal causa de no cumplimiento fue clara, la ausencia de los trabajadores por problemas económicos.

Respecto a los elementos auxiliares, el grupo contratista y subcontratista consideraron estar entre de acuerdo y totalmente de acuerdo en que la herramienta apoya a identificar interferencias de partidas en campo y a mejorar el entendimiento de la logística interna de la obra. De manera similar, los capataces manifestaron estar de acuerdo.

Respecto a los dos escenarios virtuales por día, hay dos perspectivas. Por un lado, ayuda a detallar claramente las operaciones diarias, en el cual el grupo contratista y subcontratista declararon estar totalmente de acuerdo con el uso de esta herramienta, y de manera similar, el grupo capataz consideró estar de acuerdo. Por otro lado, ayuda a controlar la producción de cada partida, donde la apreciación de los participantes contratistas y subcontratistas estuvo dividida entre de acuerdo y totalmente de acuerdo y los capataces manifestaron estar de acuerdo.

Es importante considerar que la presente encuesta fue aplicado a un grupo reducido. En consecuencia, los resultados obtenidos son aplicables solo a este proyecto y se podría extender a empresas constructores medianas y pequeñas. No obstante, la tendencia presentada debe ser corroborado en una futura investigación ante una muestra más extensa.

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

7.1.1 Sobre el *Last Planner System*

En el ámbito peruano, es un desafío comprometer a los integrantes del proyecto, así como promover la participación activa de los contratistas, capataces y proveedores en la reunión de planificación de empresas medianas y pequeñas para el adecuado funcionamiento de la herramienta LPS.

Además, es importante enseñar al último planificador y al constructor final, es decir, capataz, operarios y peones, que el acto de planificar mejora el desenvolvimiento de cada partida. Actualmente, el capataz no está dispuesto a planificar porque considera que si no cumple lo prometido entonces se le castigará o multará, pero el objetivo es identificar la causa del incumplimiento y plantear medidas correctivas, con la finalidad de evitar incurrir en el mismo error.

7.1.2 Sobre la metodología BIM

La implementación de los modelos virtuales requiere de un adecuado flujo de comunicación y un singular compromiso entre los participantes, más aún en las etapas finales, los cuales comprenden las reuniones de planificación y la transmisión del mensaje hacia el constructor. Sin ello, el modelo virtual no aporta al cumplimiento de los objetivos del proyecto.

El equipo BIM requiere contar como mínimo con un proyector, pues facilita la visualización del trabajo programado de distintas partidas, y un líder que maneje los modelos y promueva la participación de los planificadores mediante preguntas tipo ¿qué necesita para concluir con la siguiente tarea? ¿posee suficiente material? ¿los equipos se encuentran operativos?, entre otros.

El uso de modelos virtuales en la construcción constituye un reto para el equipo BIM, pues debe mantener actualizado el modelo 3D&4D, de lo contrario el modelo no es útil para la preparación tentativa de las tareas ni para las reuniones de planificación. Por ello, un adecuado despiece de las tareas, otorgar parámetros pertinentes y el manejo de vistas por cada nivel mejora el enlazado de las tareas con los componentes virtuales, así como la actualización de los mismos.

7.1.3 Sobre el modelo de integración BIM - LPS

Existe una sinergia entre el *Last Planner System* y los modelos BIM. Se inicia con la adhesión del modelo BIM 4D, compuesto por elementos estructurales definidos y elementos auxiliares genéricos, al *master schedule*. Luego, se generan alternativas de construcción del proyecto y se escoge la óptima, para ello se usa la herramienta *Choosing By Advantages*.

En el *phase schedule*, se agregan los elementos auxiliares tales como, paneles de encofrado. Luego, se genera metrados exactos de concreto y encofrado, y, en base a ello, se define opciones de secuencia constructiva de cada fase. En seguida, se usa la herramienta CBA para elegir la secuencia adecuada.

En el *lookahead planning*, se agregan los elementos auxiliares tales como refuerzo de acero, masas de logística, entre otros, con el objetivo de analizar las restricciones de las actividades a nivel de operaciones.

En el *commitment planning*, se enlazan los elementos modelados con la fecha de ejecución y se genera el modelo 4D, el cual se presenta en la reunión de planificación.

Finalmente, durante la ejecución se emplea el álbum de imágenes, que sirve para comunicarse con los constructores finales, y al término de la semana se presenta imágenes del modelo o fotografías con las tareas no completadas, a fin de analizar las principales causas de no cumplimiento y presentar medidas correctivas.

Además, el nivel de desarrollo de cada elemento modelado varía para cada nivel del *Last Planner System*, pues la información requerida en cada etapa es distinta. En el *master schedule*, se requiere que los elementos estructurales presenten el LOD 300 y los elementos auxiliares, generalmente, LOD 100. En el *phase schedule*, es necesario que los elementos estructurales y auxiliares desarrollen el LOD 350, cuya información es respecto a ubicación, metrado y sectorización. Finalmente, en el *lookahead planning*, los elementos auxiliares tales como instalaciones, andamios, acero, entre otros, presentan un LOD 100.

El presente marco conceptual es aplicable para la ejecución de la especialidad de Estructuras, en empresas medianas y pequeñas. Asimismo, se propone investigar la sinergia en las etapas iniciales del Last Planner System, es decir, a nivel de *master schedule* y *pull planning*.

7.1.4 Sobre los resultados obtenidos en el proyecto de estudio

En el caso de estudio se realizó para la etapa de *Commitment Planning* y Ejecución - Registro y Medición de métricas del modelo de integración propuesto. A continuación, se detalla las conclusiones obtenidas.

Respecto al nivel de detección de restricciones:

El modelo 4D facilitó la evaluación de la programación tentativa de tareas, lo cual se realizó junto al ingeniero residente y/o ingeniera de campo. Además, el adecuado despiece de tareas del modelo permitió acomodar el modelo a la modificación convenida.

Respecto al nivel de compromiso semanal:

La implementación del modelo 3D&4D requiere la participación activa del responsable de cada partida en obra en la reunión. De otra manera, el contratista y los subcontratistas pueden realizar la mejor planificación, con las mejores herramientas, pero, en el campo, se mantiene la planificación tradicional.

El modelo 4D permitió distribuir visualmente la programación semanal de acuerdo al desglose de las tareas, así como mejoró la visualización y comunicación en la reunión compromiso semanal.

Respecto al nivel de ejecución, registro y seguimiento de las tareas:

El álbum de imágenes facilitó la comunicación con los capataces y el entendimiento de las tareas a realizar. Asimismo, presentar el estado actual del proyecto con la descripción de las tareas, es decir, un registro fotográfico virtual, mejoró la comprensión de los planificadores acerca de las tareas no completadas. Sin embargo, en la reunión semanal faltó un espacio para dialogar, indagar la causa y plantear medidas correctivas.

Respecto al flujo de comunicación:

El flujo de comunicación en el proyecto presenta dificultades, ya que la presencia de varios intermediarios requiere del compromiso de cada uno de los involucrados para recibir y transmitir el mensaje de manera adecuada. La responsabilidad es de todos los participantes. Por ejemplo, si el capataz no participa en la reunión entonces el subcontratista debe conocer y reportar los factores que evitaron el cumplimiento del trabajo planificado. Asimismo, el capataz debe buscar conocer el compromiso semanal para informar y comprometer a los obreros.

En el escenario 2, se mejoró el flujo de comunicación, dado que se informó de manera directa y clara la programación semanal a los capataces. Sin embargo, fue insuficiente para completar las tareas, pues en unos días retornaban a la forma tradicional de trabajo. Por ello, es necesario apoyar al capataz a transmitir la planificación a su cuadrilla de trabajo, es decir, minimizar la cantidad de intermediarios que existe entre los planificadores y los últimos constructores.

Respecto al PPC:

La confiabilidad de la programación está vinculada al flujo de comunicación que existe entre los participantes durante el levantamiento de restricciones. Puesto que, si la información se transmite apropiadamente, entonces la probabilidad de obtener un alto el porcentaje de plan completado es mayor y se controla mejor las actividades del proyecto. De lo contrario, este parámetro se mantiene indiferente a pesar de implementar herramientas virtuales.

Respecto a las CNC:

La causa de no cumplimiento muestra la inadecuada coordinación que existe entre el equipo contratista y subcontratista, ello se ve reflejado en el campo. Dado que, en el escenario 1, de manera continua, se incurría en sobredimensionar las cargas de trabajo a los constructores. Por ende, no concluían a tiempo y retrasaba el desarrollo de las demás actividades. En el escenario 2, se redujo la carga de trabajo, pues se cambió la sectorización, pero se retiró un grupo de operarios y peones de las partidas de encofrado y acero, pues no se satisfizo la necesidad económica del trabajador. Por ende, para implementar nuevas herramientas de gestión es indispensable formar lazos sólidos con los constructores finales.

Además, en ambos escenarios, no se dispuso de un tiempo específico para debatir las causas de no cumplimiento con los subcontratistas y sugerir medidas correctivas por temor de generar discordias entre los participantes o que algún subcontratista indique algún error del contratista.

Respecto al TMR y TA:

La preparación de las tareas y la anticipación de las tareas están vinculadas al cumplimiento de las tareas programadas, que a su vez depende del flujo de comunicación y compromiso que existe entre los trabajadores.

Luego de analizar los indicadores del caso de estudio y los problemas de obra, se concluye que existen barreras en la cultura peruana que presentan las pequeñas y medianas empresas, lo cual dificulta la adecuada implementación del *Last Planner System* y de los modelos virtuales BIM, entre ellos se encuentran los siguientes:

- Falta de disponibilidad de los constructores finales para planificar.
- Falta de compromiso entre los participantes, contratista, subcontratista y obreros.
- Problemas económicos con el personal obrero.

Respecto a la entrevista semiestructurada:

Las siguientes afirmaciones son válidas para el proyecto de estudio; sin embargo, se podría replicar para empresas de similares características que es la mayoría de la industria nacional. Una futura investigación puede evaluar las siguientes conclusiones, que serían consideradas como hipótesis, al considerar una muestra más grande.

- El modelo BIM 3D&4D mejoró la visualización de las tareas planificadas al grupo contratista, subcontratista y capataz, que habitualmente usaban los planos 2D y los cronogramas de Excel.
- El modelo BIM 3D&4D mejoró la comunicación en la reunión de programación y coordinación con el contratista, subcontratista y capataz. Sin embargo, el grupo capataz consideró suficiente el uso de los planos 2D para comunicarse con el equipo técnico.
- El modelo BIM 3D&4D mejoró el entendimiento de las actividades no completadas. Sin embargo, dada las limitaciones de la implementación LPS en el proyecto, no se realizó un análisis adecuado de las causas de no cumplimiento.
- La visualización de dos escenarios virtuales por día mejoró el nivel de entendimiento de las operaciones diarias en campo en el grupo contratista, subcontratista y capataz, pues se representó más de una actividad localizada en el mismo espacio y, además, los elementos auxiliares representaron de manera cercana los elementos que existen en el campo de la construcción, tales como encofrado, acero, entre otros.
- El modelo BIM 3D&4D mejora la planificación y distribución del personal obrero en campo. Debido a las limitaciones de logística, no se realizó la reunión con el personal obrero. Sin embargo, en una investigación realizada por Mourgues (2007), se concluye que Virtual Huddle provee una oportunidad al contratista y al personal para

dialogar, planificar y distribuir los entregables semanales. Así como, reduce la latencia en resolver problemas, tales como materiales, mano de obra u otra información.

- Los elementos auxiliares ayudaron a un adecuado entendimiento del alcance de las tareas y permitió preparar el cronograma tentativo de actividades, pues se consideró que el área de trabajo se encuentre disponible para la labor de las partidas. Además, permitió entender, al grupo contratista y subcontratista, la logística interna de la empresa; sin embargo, debido a las limitaciones de trabajar con los operarios y peones no se consiguió transmitir la planificación de la ubicación de los materiales a campo, por ejemplo, lugar de acopio de encofrado, acopio de acero, entre otros.

7.2 Recomendaciones

Se recomienda estipular contractualmente la obligatoria participación de un representante del subcontratista con facultades para tomar decisiones y del responsable de la partida en obra. De modo que, permita resolver las restricciones en la reunión de planificación. (Murguía, D.; Brioso, X. & Pimentel, A, 2016).

Antes y durante la construcción, se recomienda instruir a los integrantes del proyecto mediante capacitaciones, charlas continuas, de modo que mejore el performance de las herramientas LPS y modelos BIM. Así como, se aconseja impulsar la participación de los involucrados en la planificación y fortalecer el compromiso entre el grupo contratista subcontratista y constructor. Para ello, es conveniente generar un adecuado clima laboral y elaborar un plan de incentivos relacionado con el cumplimiento de las tareas.

Se recomienda modificar el layout de la reunión de programación. Para ello, se debe contar con un proyector y luego, colocar el modelo virtual enfrente y los involucrados en media luna alrededor del modelo, con el objetivo de que todos interactúen.

Además, se debe integrar a una persona que realice las funciones siguientes: presidir la reunión; monitorear el modelo 4D; facilitar la comunicación entre los planificadores; informar al personal la planificación mediante el álbum de imágenes; supervisar el cumplimiento de la programación semanal; y, mantener actualizado el modelo 4D.

Se recomienda una integración temprana entre el modelador BIM, el planificador y el constructor, a fin de evaluar las alternativas de sectorización de elementos verticales y horizontales, la constructabilidad, la distribución de la logística y el acopio de los elementos temporales.

BIBLIOGRAFÍA

- Aliaga, G. (2012). "Implementación y metodología para la elaboración de Modelos BIM para su aplicación en Proyectos Industriales Multidisciplinarios". Santiago, Chile
- American Institute of Architects (2008) "AIA Document G202™ – 2013 Project Building Information Modeling Protocol Form"
- Arroyo, P., Tommelein, I.D. & Ballard, G. (2013) "Using 'Choosing by Advantages' to From a Global Sustainable Perspective," in *Proceedings 21th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*. Fortaleza, Brazil.
- Ballard, G. (1999) "Improving Work Flow Reliability," in *Proceedings 7th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*, Berkeley, USA.
- Ballard, G. (2000). "Phase Scheduling," in *Lean Construction Institute White Paper-7*, Abril 2000.
- Ballard, G., & Tommelein, I. (2016). "Current Process Benchmark for the Last Planner System," in *Lean Construction Journal*. Berkeley.
- Bhatla, A., & Leite, F. (2012). "Integration framework of BIM with The Last Planner System," in *Proceedings 20th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*. San Diego, California. USA
- BIM FORUM. (2013). "BIM FORUM". Recuperado el 15 de Junio de 2015, de BIM FORUM: <http://www.bimforum.cl/264/>
- Brioso, X. (2013). "Construcción de Edificaciones". Lima.
- Comité BIM del Perú. (2014). "Empresas participantes". Obtenido de <http://www.comitebimdelperu.com/2014/participantes.html>
- Comité BIM del Perú. (2014). "Beneficios del ciclo BIM". Obtenido de <http://www.comitebimdelperu.com/2014/docs/Beneficios%20del%20Ciclo%20BIM.pdf>
- Dang, D. T. (2012). "Impact of 4D Modeling on Construction Planning Process". Sweden.
- Dave, B., Koskela, L., & Kiviniemi, A. (2013). "Implementing Lean in construction: Lean Construction and BIM," in *CIRIA Guide to Implementing Lean in Construction C725*.
- Davies, N. (2014) "LOD = LOD + LOI". Recuperado el 9 de febrero del 2017, de: <http://www.evolve-consultancy.com/resource/bim-brief/lod-lod-loi>
- Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2008). "BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors". New Jersey: John Wiley & Sons.
- Forbes, L., & Ahmed, S. (2011). "Modern Construction". New York: Taylor and Francis Group, LLC.
- Ghio, Virgilio. (2001) "Productividad en Obras de Construcción: Diagnóstico, Crítica y Propuesta" Lima: Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

- Guzmán, A. (2014). “Aplicación de la Filosofía Lean Construction en la Planificación, Programación, Ejecución y Control de Proyecto”. Tesis: Facultad de Ciencias e Ingeniería. PUCP - Lima.
- Hamzeh, A., & Aradi, O. (2013). “Modeling the Last Planner System Metrics- A Case Study of an Aec Company,” in *Proceedings 21th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*, Fortaleza, Brasil.
- INEI. (2017). “Producción Nacional”. Lima.
- Khan, S. & Tzortzopoulos, P. (2014). “Effects of the interactions between LPS and BIM on workflow in two building design projects,” in *Proceedings 22th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*. Oslo, Norway.
- Koskela, L., Tzortzopoulos, P., & Tezel, A. (2009). “Visual Management - A General Overview”. Estambul, Turkey.
- McKinney, K., Fischer, M., & Kunz, J. (1998). “Visualization of construction planning information”. January 6 – 9. San Francisco. CA.
- Mourgues, C. (2012). “Seminario BIM”. Lima, Perú.
- Mourgues, C., Fischer, M., & Hudgens, D. (2007) “Using 3D and 4D Models to Improve Jobsite Communication - Virtual Huddles Case Study,” in *24th International Conference on Information Technology for Construction*, 91-96.
- Murguía, D. (2015). “Gestión BIM de la construcción”. Lima.
- Murguía, D., Brioso, X. & and Pimentel, A. (2016). “Applying Lean Techniques to Improve Performance in the Finishing Phase of a Residential Building,” in *Proceedings 24th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*, Boston. USA.
- Murguía, D. & Brioso, X. (2017) “Using Choosing by Advantages and 4D Models to Select the Best Construction-Flow Option in a Residential Building,” in *Procedia Engineering*.
- O'Connor, R. & Swain, B. (2013) “Implementing Lean in construction: Lean tools and techniques - an introduction,” in *CIRIA Guide to Implementing Lean in Construction C730*.
- Olgún, R. (2011). “Estudio de Impacto por la Implementación de un modelo 4D y Last Planner en Obra”. Santiago. Chile.
- Orihuela, P; Canchaya, L & Rodríguez, E. (2015) “Gestión Visual del Sistema Last Planner Mediante el Modelado BIM,” in *SIBRAGEC - ELAGEC*.
- Orihuela, P. & Orihuela, J. (2003). “Constructabilidad en pequeños proyectos inmobiliarios,” en VII Congreso Iberoamericano de Construcción y Desarrollo Inmobiliario – MDI. Lima.
- Orihuela, P., Orihuela, J., & Vásquez, J. (2008). “El lean design y el enfoque hacia el cliente,” en IV Congreso Internacional de la Construcción – ICG. Lima.

- Parrish, K., & Tommelein, I. (2009). "Making Design Decisions using Chossing By Advantages," in *Proceedings 17th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*, Taipei, Taiwan.
- Sacks, R., Koskela, L., Bhargav, & Owen, R. (2009). "Interaction of Lean and Building Information Modeling in Construction". *Journal of Construction Engineering and Management*. ASCE. USA
- Schöttle, A., Arroyo, P. & Bade, M. (2015). "Comparing three Methods in the Tendering Procedure to Select the Project Team," in *Proceedings 23th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*. Perth, Australia.
- SIEMENS. (2015). "PDM Product Data Management". Recuperado el 15 de junio de 2015, de: http://www.plm.automation.siemens.com/en_us/plm/pdm.shtml
- Strafaci, A. (2008). "Contech Engineering Solutions". Recuperado el 1 de Junio de 2015, de *Contech Engineering Solutions*: <http://cenews.com/article/6098/what-does-bim-mean-for-civil-engineers>
- Tezel, A., Koskela, L. and Tzortzopoulos, P. (2009). "The Functions of Visual Management," in *Proceedings of the International Research Symposium*, Salford, UK.
- Wang, L. (2007). "Using 4D Modeling to Advance Construction Visualization in Engineering Education," in *Computer Integrated Construction*. USA

