

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**INTERACCION ENTRE BIM Y LEAN CONSTRUCTION ANALIZADAS EN PROYECTOS
DE EDIFICACION**

Tesis para optar por el título de Ingeniero Civil, que presenta el bachiller:

DIEGO GERARDO FLOREZ CAJACURI

Asesor:

FRANK ROBERTO CHUQUIN MONTOYA

LIMA, Junio, 2020

RESUMEN

La presente tesis busca presentar tanto la metodología de BIM y Lean Construction mediante una investigación teórica para ampliar los conocimientos sobre ambas y mostrar las interacciones que se encontraron en investigaciones ya realizadas, principalmente, las interacciones positivas. Con esto se busca reducir los típicos problemas que se encuentran en la construcción, en este caso, de edificación, tales como mucha incertidumbre, baja productividad, grandes desperdicios, pocas herramientas que faciliten la planificación y el modelamiento. Luego, se muestra que el uso de BIM en proyectos multifamiliares beneficia los principios y herramientas de Lean Construction, para ello se analizan 3 proyectos multifamiliares desarrollados en Lima, en los que en uno de ellos se utiliza solamente la filosofía del Lean Construction mientras que en los otros dos, se implementa la metodología de BIM, uno de ellos durante la etapa de diseño y el otro durante la etapa de construcción. Se analizan diferentes herramientas, por ejemplo, la cantidad de requerimientos de información por metro cuadrado (RDIs/m²), el costo en soles por metro cuadrado que generan los adicionales (S/. /m²), así como los principios de Lean que se ven positivamente influenciados debido a la implementación de las funcionalidades BIM. Finalmente, se obtienen diversas conclusiones producto de la investigación realizada y se concluye que el uso de BIM influencia positivamente en los proyectos de edificación y potencia los principios teóricos y prácticos de Lean Construction. Sin embargo, los resultados positivos dependen de mucho esfuerzo, dedicación, aprendizaje y retroalimentación en el tiempo por parte de la empresa encargada de la adopción BIM, así como de la experiencia y del buen proceder del equipo de trabajo elegido para ejecutar la obra para obtener resultados y mejoras positivas en el tiempo.

AGRADECIMIENTO

“Agradezco a mis padres por brindarme la posibilidad de estudiar esta carrera en la Pontificia Universidad Católica del Perú y por siempre estar ahí cuando los necesité.

También, agradezco a mi asesor Frank Chuquín por su compromiso, orientación y constante apoyo en la elaboración de la tesis”

Diego Gerardo Flórez Cajacuri



INDICE

CAPITULO 1: Introducción	1
1.1 Introducción general	1
1.2 Objetivos:	1
1.2.1 Objetivo general:.....	1
1.2.2 Objetivos específicos:	1
1.4 Justificación:.....	2
1.5 Metodología de investigación:.....	2
CAPITULO 2: Revisión de literatura.....	4
2.1 Building Information Modelling.....	4
2.1.1 Definición de BIM:	4
2.1.2 BIM aplicado a diferentes etapas en la industria de arquitectura, construcción e ingeniería	7
2.1.3 Revisión de herramientas BIM	10
2.1.4 Impacto de BIM en el diseño, construcción y operación.....	16
2.1.5 BIM para empresas contratistas:	20
2.1.6 Dificultades en la aplicación BIM:	22
2.2 Lean Construction.....	25
2.2.1 ¿Qué es Lean Construction?:	25
2.2.2 Lean Project Delivery System: metodología y aplicación en diferentes etapas de aplicación.	28
2.2.3 Revisión de las herramientas del Lean Construction:	30
2.2.4 Integrated Project Delivery (IPD):	38
2.2.5 Target Value Design (TVD)	40
2.2.6 Set-Based Design:	42
CAPITULO 3: Integración entre BIM y Lean	45
3.1 Interacciones positivas y negativas entre las dos metodologías	45
3.1.1 Principios Lean con mayores interacciones con funcionalidades BIM	48
3.1.2 Funcionalidades BIM con mayores interacciones con principios Lean	54
CAPITULO 4.0 Casos aplicativos estudiados:	59
4.1 Casos a analizar	59
4.2 Proyecto A:.....	61
4.3 Proyecto B:	70
4.4 Proyecto C:.....	76

4.5 Resumen de interacciones BIM y Lean encontradas	85
CAPITULO 5.0 Conclusiones y recomendaciones:	88
5.1 Conclusiones	88
5.2 Recomendaciones	91
BIBLIOGRAFIA:.....	93
ANEXOS	100
ANEXO 1: Explicación de las celdas de la matriz de interacción.....	100
ANEXO 2: Matriz de funcionalidades BIM con mayores interacciones con los principios Lean .	105
ANEXO 3: Matriz de principios Lean con mayores interacciones con las funcionalidades BIM .	107

INDICE DE TABLAS:

Tabla 1: Clasificación de problemas	23
Tabla 2: Resumen de los proyectos analizados en este capítulo	59
Tabla 3: Datos a analizar del Proyecto A	61
Tabla 4: Penalidades del Proyecto A	62
Tabla 5: Cantidad y porcentajes de RFIs por áreas para el Proyecto A	64
Tabla 6: Adicionales y deductivos para el Proyecto A	65
Tabla 7: Datos a analizar del Proyecto B.....	71
Tabla 8: Cantidad y porcentajes de RFIs por áreas para el Proyecto B.....	71
Tabla 9: Incidencia de BIM en los Proyectos A y B	73
Tabla 10: Datos a analizar para el Proyecto C	77
Tabla 11: RFIs por categorías en el Proyecto C	79
Tabla 12: RFIs de la categoría de incompatibilidades en el Proyecto C	80
Tabla 13: RFIs de la categoría de alcance en el Proyecto C	81
Tabla 14: RFIs de la categoría de problemas de diseño en el Proyecto C.....	81
Tabla 15: Resumen de interacciones encontradas	86

INDICE DE FIGURAS:

Figura 1: Beneficios de BIM asociados a los problemas crecientes en el ciclo de vida de un proyecto.	6
Figura 2: Método tradicional de revisión de diseño.	7
Figura 3: Trabajo colaborativo en el Victoria Station Upgrade Project.	9
Figura 4: Desarrollo de un modelo conceptual de un edificio durante un proceso de BIMStorm.	11
Figura 5: Ejemplo de mapeo de procesos.	14
Figura 6: Intercambio de información con BIM y sin BIM	17
Figura 7: LOD o niveles de desarrollo	19
Figura 8: Personal de gestión de instalaciones involucrados en la fase de diseño y construcción.	24
Figura 9: Ejemplo de sectorización.	35
Figura 10: Presentación pucp lean construction	36
Figura 11: Comparación modelo de diseño basado en conjunto y modelo de diseño basado en punto	43
Figura 12: Principios y funcionalidades con mayor número de interacciones.	46
Figura 13: Porcentaje de RFIs por áreas para el Proyecto A	65
Figura 14: Precios de adicionales y deductivos para el Proyecto A.	66
Figura 15: Herramientas y principios Lean utilizados	68
Figura 16: Interacciones Lean y BIM que no se aplicaron para el Proyecto A	69
Figura 17: Porcentaje de RFIs por áreas para el Proyecto B. Fuente: Elaboración propia	72
Figura 18: Influencia de BIM en la etapa de construcción.	75
Figura 19: Causas de los RDIs en el Proyecto C	82
Figura 20: Influencia de BIM en el diseño.	84

CAPITULO 1: Introducción

1.1 Introducción general

Actualmente, el sector construcción enfrenta diversos problemas, tales como incongruencias en los planos debido a las diversas ramas de ingeniería que participan en los proyectos, presupuestos muy ajustados que en muchos casos no reflejan lo que ocurre en la realidad, baja productividad, procesos constructivos deficientes, no existe un adecuado flujo de actividades, pobre planificación, deficiencia en la logística y pobre calidad en la construcción.

Todos estos problemas presentados generan una pérdida tanto en costo como en tiempo y que termina perjudicando a todos los participantes del proyecto. Es por ello, que surgen filosofías, nuevas herramientas y métodos que buscan reducir o eliminar los problemas presentados.

Una de estas filosofías es Lean Construction y una metodología es Building Information Modelling (BIM), la tesis busca mostrar las interacciones positivas que se encuentran al momento de aplicar tanto la metodología BIM y la filosofía Lean Construction en proyectos de edificación.

1.2 Objetivos:

1.2.1 Objetivo general:

Mostrar las interacciones positivas entre Lean Construction y BIM encontradas en los casos analizados de proyectos de vivienda multifamiliar

1.2.2 Objetivos específicos:

- Presentar las metodologías Lean y BIM a utilizar
- Presentar las ventajas que implica aplicar la metodología de BIM y Lean Construction en la etapa de diseño de una obra de edificación
- Mostrar la influencia de las herramientas de Lean y BIM en la etapa de construcción

- Analizar las interacciones positivas entre Lean y BIM para 3 casos de estudio de proyectos de edificación.

1.4 Justificación:

En Lima existe una gran demanda de viviendas multifamiliares que debe ser cubierta a partir de la ejecución de proyectos de edificación eficientes. Para ello, el sector utiliza diversas herramientas, metodologías o filosofías que buscan reducir los problemas típicos que surgen durante la construcción, como es el caso de la filosofía de Lean Construction y Building Information Modelling.

Esta tesis muestra las interacciones positivas encontradas de los principios de Lean Construction y de las funcionalidades de BIM a partir de la aplicación propia que cada empresa le dio a sus proyectos. Para ello, analiza tres proyectos de construcción, uno en el que solamente se utilizó la filosofía de Lean y en los otros dos ya se incluye BIM, en uno de ellos en el diseño y en el otro en la etapa de construcción.

Además, incluye, para el proyecto Lean, qué se hubiera mejorado si se aplicaba la metodología de BIM. Por otro lado, para los proyectos BIM, incluye algunas funcionalidades BIM que no se utilizaron y que habrían ayudado al desarrollo del proyecto.

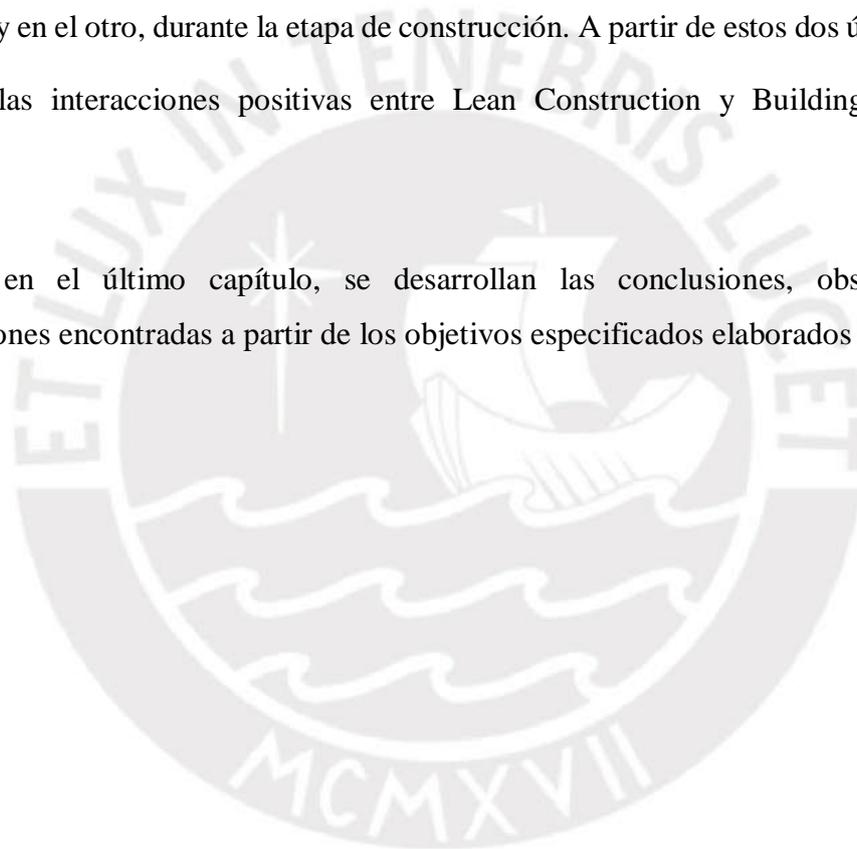
1.5 Metodología de investigación:

Primero, la presente tesis explicará en el capítulo 2 toda la literatura que se considere necesaria para poder analizar adecuadamente la filosofía de Lean Construction y de Building Information Modelling, se muestran las herramientas de Lean Construction y las funcionalidades de Building Information Modelling que se pueden aplicar en la etapa de diseño y en la de construcción.

Luego, para poder realizar un análisis propio sobre las interacciones, se muestra y se analiza primero una investigación realizada sobre las interacciones entre los principios de Lean y las funcionalidades de BIM en el capítulo 3 para mostrar un paso inicial sobre cómo se analizarán las interacciones.

Seguidamente, en el capítulo 4, se analizan los 3 casos de estudio comparativos, en los que se muestra la diferencia que hay entre un proyecto en el que solamente se aplicó la metodología Lean con otros dos proyectos, para los cuales, en uno de ellos se aplicó BIM durante el diseño del proyecto y en el otro, durante la etapa de construcción. A partir de estos dos últimos, es que se analizan las interacciones positivas entre Lean Construction y Building Information Modelling.

Finalmente, en el último capítulo, se desarrollan las conclusiones, observaciones y recomendaciones encontradas a partir de los objetivos especificados elaborados inicialmente.



CAPITULO 2: Revisión de literatura

2.1 Building Information Modelling

2.1.1 Definición de BIM:

Building Information Modelling (BIM) es una metodología que busca mejorar las distintas fases de un proyecto de construcción para una edificación a través de un trabajo colaborativo entre los participantes del proyecto, un conjunto de procesos y tecnologías aplicadas para la gestión del proyecto y un modelado del edificio en formato 3D creado a partir de la información reunida. El concepto de BIM fue mencionado por primera vez por el profesor Chuck Eastman en el año 1975 en su trabajo “An outline of the Building Description System”.

El British Standard Institution o BSI (s.f) define BIM como:

BIM es la gestión de la información a lo largo de todo el ciclo de vida de un activo construido, desde el diseño inicial hasta la construcción, el mantenimiento y finalmente la puesta en servicio, mediante el uso del modelado digital. BIM tiene que ver con la colaboración, entre ingenieros, propietarios, arquitectos y contratistas en un entorno de construcción virtual tridimensional (entorno de datos común), y comparte información a través de estas disciplinas. (parr.1)

En el mismo sentido, el Comité de Proyectos Estándar del Modelo de Información Nacional de Construcción (NBIMS-US, 2015) lo define como:

Building Information Modelling (BIM) es una representación digital de las características físicas y funcionales de una instalación. Como tal, sirve como un recurso de conocimiento compartido para información sobre una instalación, formando una base confiable para las decisiones durante su ciclo de vida desde el inicio en adelante. (p.2)

A partir de las dos definiciones presentadas, está claro que ambos estándares consideran que BIM es una metodología que se debe utilizar durante todo el ciclo de vida del proyecto, además ninguna considera que es solo un software (como muchas veces se lo pensar).

Por otro lado, la definición presentada por el estándar británico resulta, posiblemente, más completa y con un enfoque más amplio. En esta se incluye algo muy importante que es la colaboración entre los diferentes profesionales que normalmente trabajan durante un proyecto de construcción. Además, especifica que BIM será un entorno compartido de construcción virtual en un formato 3D, algo que el estándar norteamericano no incluye en su definición. Por último, el estándar británico expresa que BIM es la gestión de la información, algo que es muy importante para que se tenga claro que esta metodología ayudará a mejorar la productividad y competitividad de la organización o empresa.

En la figura 1 se busca resumir en gran medida, para facilidad del lector, algunos beneficios importantes de la aplicación de BIM en un proyecto de edificación con la finalidad de alejarse del paradigma de que BIM es simplemente un software. Por ejemplo, al aplicarlo adecuadamente durante el ciclo de vida del proyecto se podrá reducir el tiempo y el costo para el diseño y construcción, menor costo de uso de energía, mejor rendimiento del edificio, diseño y construcción sostenible y diseños más complejos. Todos estos beneficios resultarán en una reducción del proyecto en general tanto en costo como en tiempo beneficiando a todos los interesados.



Figura 1: Beneficios de BIM asociados a los problemas crecientes en el ciclo de vida de un proyecto.

Adaptado de Eastman, C. et al (2011). Bim Handbook: A guide to Building Information modelling

La idea de BIM no es actual ya que surge aproximadamente 50 años atrás. Según Eastman et al (2011), los costos que se generan en un edificio al momento de diseñar y construir un edificio se deben debido a que se recurre a los dibujos para colocar detalles del edificio. Por ello, Eastman propone un diseño de un sistema informático tal que permita almacenar y manipular la información del proyecto en un detalle tal que permita el diseño, la construcción y el análisis operativo.

Tuvo que pasar 30 años desde la idea inicial de Eastman para que en el 2002 la empresa Autodesk publique un documento sobre el modelado de información para la construcción. A partir de esto, proveedores y desarrolladores se involucraron en el tema y el término de modelado se estandarizó.

Debido a que muchos desarrolladores de software intentan vender sus productos para la aplicación de BIM, esto puede provocar confusiones sobre lo que significa esta metodología, es por ello que es importante distinguir qué no es BIM. Por ejemplo, programas que solamente contienen visualización en 3D y no tienen otras funciones tales como análisis del diseño o

integración de datos, modelos compuestos por múltiples archivos de CAD 2D integrados para formar el elemento en 3D ya que no se puede asegurar la confiabilidad de este último y modelos que permiten cambiar las dimensiones en una vista pero no en otras. (Eastman et al, 2011)

2.1.2 BIM aplicado a diferentes etapas en la industria de arquitectura, construcción e ingeniería

La figura 2 intenta mostrar cómo se lleva a cabo el proceso de diseño convencional. Estos enfoques tradicionales en la industria consistían en primero realizar el diseño de la estructura, luego realizar una licitación y a partir de esta, elegir al constructor, que en muchos casos era aquel que licitaba con precios más bajos y que seguramente tendría problemas en calidad, en seguridad y en el plazo, lo que llevaba a un cronograma más ajustado y que por ende, algunos trabajos no se realizarán de manera adecuada.

Además, el realizar este enfoque llevaba a que en etapas futuras del proyecto existan cambios en el diseño debido a errores u omisiones, condiciones del sitio no previstas, preguntas sobre los planos, nuevos requerimientos del cliente, entre otros. Estos problemas generan RFIs (Request for Information) que son consultas que surgen debido a alguna incongruencia y que, de ser resueltas, en algunos casos, llevan a realizar una modificación en el plano o incluso crear dibujos nuevos generando costos adicionales y pérdidas en tiempo.



Figura 2: Método tradicional de revisión de diseño.

Adaptado de Dave,B. Koskela,L. Kiviniemi,A. Tzortzopoulos,P. (2013). Implementing Lean in Construction

La metodología BIM busca un flujo de trabajo que abarque todo el ciclo de vida del proyecto. Durante el diseño, no solo se utiliza BIM como una herramienta para mostrar la edificación en 3D, sino que se realiza un intercambio de ideas y se muestran múltiples opciones entre los participantes del proyecto para darle valor a la idea del cliente y que este pueda elegir la mejor opción para el producto final.

Generar valor implica entender la idea y el propósito del cliente y ayudarlo a que cumpla estos propósitos con el mínimo esfuerzo de tiempo y costos. En el mismo sentido, durante la etapa de factibilidad es importante que se entienda para todos los participantes, por qué se debe crear un edificio, qué se necesita para crearlo y cómo se va a lograr. Por medio de BIM, además, se puede crear una visualización rápida de las alternativas del proyecto, juntando así diferentes perspectivas, tales como la estructura del edificio junto con la mecánica y la parte eléctrica, evaluar estimaciones de los costos, cumplimiento de los requisitos y sostenibilidad de los objetivos. (Koskela et al, 2013)

También, como se muestra en la figura 3, es necesario realizar un trabajo colaborativo durante el diseño para que el cliente pueda proporcionar la información necesaria a los profesionales de las distintas ramas y así reducir el riesgo de cada parte interesada. Es importante que cada participante elabore su propio modelo y que este sea actualizado conforme avancen el resto de involucrados. Por ejemplo, en la imagen se plantea la forma de trabajo colaborativo entre distintos participantes, se observan 2 dibujantes CAD, también que se encuentra el arquitecto y el ingeniero estructural en el mismo ambiente lo que facilitaría la colaboración entre especialidades.



Figura 3: Trabajo colaborativo en el Victoria Station Upgrade Project.

Adaptado de Dave,B. Koskela,L. Kiviniemi,A. Tzortzopoulos,P. (2013). Implementing Lean in Construction

Si bien la aplicación de BIM es esencialmente importante durante etapas tempranas del proyecto, aplicarlo durante la construcción genera gran productividad para el proyecto, no solo en cuanto a tiempo y dinero, sino también se reducen los errores y los conflictos durante esta etapa.

Durante la construcción, se plantea la aplicación de modelos 4D que sirven para evaluar y modelar la secuencia de construcción planeada en un modelado 3D. Es importante que los objetos del modelado estén vinculados a las diferentes actividades de acuerdo con el cronograma del proyecto y que estén agrupados según las fases de construcción. La importancia radica principalmente en que se impulsará el trabajo colaborativo y se evitarán los famosos “cuellos de botella”, que son actividades que disminuyen la productividad al incrementar los tiempos de espera.

Además, es conocido que el sector de la construcción es uno de los más peligrosos. En una obra de construcción tradicional, hay riesgos como caídas, ser golpeados por algún objeto, riesgos en electricidad, quemaduras, entre otros. Es por ello, que las herramientas BIM 4D también se pueden utilizar para mejorar las condiciones de seguridad al identificar los peligros.

Según BIM Community (2016) se puede mejorar las condiciones a partir de la inspección visual de las condiciones del sitio, identificación de peligros potenciales y eliminación de riesgos y mejoras en las condiciones de seguridad.

Por ende, aplicar BIM después del diseño posee múltiples beneficios entre los que se encuentran ayudar a reducir los riesgos laborales mediante el reconocimiento de posibles riesgos en el área de construcción, visualización de la etapa constructiva, optimización de los plazos y mejora en la cadena de suministro mediante la operación y control del cronograma maestro y las programaciones de trabajo y mejora también en la logística de materiales y equipos.

2.1.3 Revisión de herramientas BIM

Las herramientas BIM están basadas en un modelado paramétrico, la idea principal es que las diferentes formas y propiedades se pueden modificar y controlar a partir de una jerarquía de parámetros. Estos parámetros dependen de valores que son definidos por el usuario, de valores fijos y algunos otros de formas en 2D o 3D.

Durante la etapa de factibilidad, el cliente y el equipo de trabajo definen el alcance, desarrollan programas y definen los requerimientos del proyecto. Existe una herramienta BIM que facilita esta labor llamada BIMStorm, el cual es un proceso desarrollado por Onuma System (un equipo de arquitectos y programadores de computadora), en el cual el equipo de trabajo debe conceptualizar el proyecto, revisar distintas fuentes y evaluar diferentes opciones de diseño considerando el tiempo, costo y sostenibilidad del proyecto. El equipo desarrolla un modelo conceptual del edificio, tal y como se muestra en la figura 4.



Figura 4: Desarrollo de un modelo conceptual de un edificio durante un proceso de BIMStorm.

Tomado de Eastman, C. Teicholz, P. Sacks, R. Liston, K. (2011). Bim Handbook: A guide to Building Information modelling

Otras herramientas utilizadas y que se presentaron en la sección anterior son las llamadas herramientas BIM 4D, las cuales ayudan a reducir riesgos laborales, optimizar las cadenas de suministro, los plazos, operaciones de obra y a mejorar la comunicación entre los participantes del proyecto ya que estos modelos ayudan a mostrar aspectos del cronograma, incluso espacialmente (lo que sería más efectivo que un diagrama de Gantt). También, permiten el comparar cronogramas e identificar fácilmente si el proyecto se encuentra atrasado o en el tiempo correcto.

Una definición interesante de estas herramientas 4D es la desarrollada por Fischer et al (2006), ellos mencionan que estas herramientas son una representación de la transformación o cambio del espacio de trabajo a través del tiempo. Esto se logra mediante una vinculación de la representación digital 3D y el cronograma de trabajo, en otras palabras, es la integración de los aspectos temporales y espaciales de la planificación mostrada en una representación gráfica.

Como se mostró anteriormente, los beneficios de estas herramientas son los siguientes:

- Visualización de la etapa constructiva: Los profesionales encargados de gestionar la producción podrán visualizar las secuencias productivas. Esto les permitirá elegir si la

secuencia productiva, a su parecer, es la ideal para llevar a cabo el trabajo de la mejor manera, rápido, con menos costo y con mayor seguridad.

Además, se pueden realizar programaciones semanales o diarias que ayudarán al personal de campo o a la producción de la obra a visualizar los requerimientos productivos para cada actividad, así como la posibilidad de proponer recomendaciones para las secuencias productivas.

- **Site-Layouts:** Esta palabra compuesta hace referencia a un diseño ilustrativo del área de trabajo. La finalidad de esta actividad es que los ingenieros a cargo puedan visualizar diferentes alternativas de posicionamiento de equipos (en el caso de grúas, volquetes, etc), traslado y almacenamiento de materiales, posibles rutas de evacuación para seguridad de personal, etc. Con esta visualización y elección de diferentes opciones se reducen los riesgos laborales y se aprovecha al máximo el espacio en el sitio, aumentando la productividad y evitando el congestionamiento.
- **Reconocimiento de riesgos:** Como se explicó anteriormente, se podrá visualizar las condiciones de seguridad del sitio antes de empezar a realizar la construcción e incluso desde la etapa de planificación. Además, al identificar los peligros potenciales se podrá diseñar un plan de seguridad y centrarse en cada riesgo individual con su respectivo flujo de trabajo, de tal forma que los trabajadores puedan estar alertas al momento de ejecutar las actividades.
- **Operación y control de la programación:** Esto ayudará a que los ingenieros puedan seguir los procesos día a día visualmente, de tal forma, podrán verificar si los procesos constructivos son los más adecuados y seguros. En caso contrario, podrán plantear diversas alternativas y editar el cronograma fácilmente.
- **Logística para los materiales y equipos:** Con ayuda del modelado, se podrá visualizar movimientos de materiales en la zona, requerimiento de equipos para realizar los

trabajos, puntos de acopio. Todo esto ayudará a que exista un inventario de materiales y no se produzcan retrasos debido a la no disponibilidad de estos. Sería ideal en este caso, el uso de las herramientas BIM 4D que permitan integrar el modelado al diagrama Gantt del proyecto, lo cual permitiría un mejor control sobre lo programado.

Dentro de la gestión BIM, es importante conocer lo que significa un mapeo de procesos. Esta nueva herramienta busca visualizar el flujo de trabajo a partir de involucrar a los responsables en una serie de eventos para obtener un resultado final. Gracias a esto, las empresas podrán lograr una mayor eficiencia, así como reducir los tiempos al simplificar los proyectos.

Para elaborar un mapeo de procesos, LucidChart (s,f), un programa para crear flujo de procesos en línea, considera que primero se debe identificar el problema u objetivo, es decir, definir el proceso que necesita ser evaluado para luego decidir quién y cuándo realizará una determinada actividad. Seguidamente, será necesario definir los límites del proceso, en otras palabras, se deberá decidir cuándo empieza y finaliza la actividad. Finalmente, se deberán determinar y secuenciar los pasos, será importante que se involucre al resto de participantes durante esta etapa para verificar que los pasos se muestran de la manera adecuada.

En la figura 5, se muestra un ejemplo de cómo es posible representar el mapeo de procesos ya que se trata de una herramienta visual. Se pueden utilizar óvalos para representar el comienzo del proceso, rectángulos para mostrar una actividad que debe realizarse, un paralelogramo para representar entradas o salidas, un rombo para representar un momento en el cual se debe tomar una decisión y las flechas que indican la secuencia de los pasos.

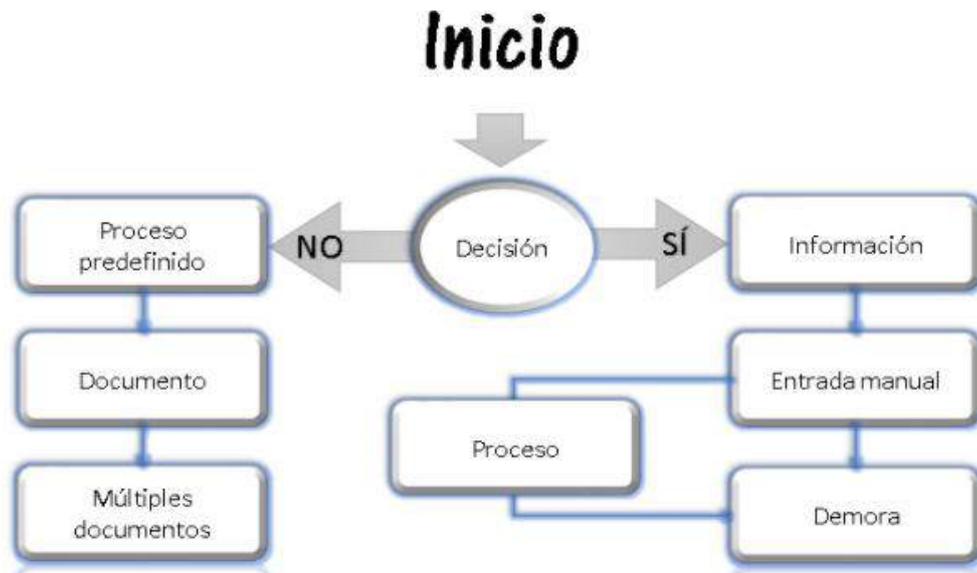


Figura 5: Ejemplo de mapeo de procesos.

Adaptado de Lucidchart (s/f). ¿Qué es el mapeo de procesos?. Obtenido de <<https://www.lucidchart.com/pages/es/como-crear-un-mapa-de-procesos> >

Una herramienta perteneciente a otra metodología llamada Virtual Design Construction que utiliza como herramienta principal el modelado de la edificación y que puede potenciar la colaboración BIM son las reuniones de ingeniería concurrente ICE, que en inglés significa Integrated Concurrent Engineering. Estas reuniones se realizan periódicamente y deben incluir la participación activa de diseñadores, ingenieros, subcontratistas, constructores, arquitectos y el cliente con la finalidad de enriquecer el modelo de diseño a partir de las ideas del conocimiento y experiencia de cada participante.

Para desarrollar estas sesiones en un ambiente BIM de manera adecuada, será necesario planificar adecuadamente la sesión, es decir definir la agenda, los problemas a solucionar, los participantes y alinearlos con el objetivo del proyecto. Además, el espacio de trabajo debe ser adecuado (para la interacción BIM), se recomienda que exista proyección para la buena visualización de los problemas. En adición, sería adecuado contar con un plan de seguimiento para la validación de los problemas resueltos. (Villanueva-Meyer, S/f, parr.6)

Por otro lado, debido a que BIM incentiva un trabajo colaborativo entre los participantes del proyecto, es necesario que los software BIM permitan realizar modificaciones en el proyecto y que estas estén disponibles en tiempo real para todos los involucrados, además, cualquier repercusión que se pueda originar debido a la modificación deberá darse de manera automática sobre los elementos que se vean influenciados.

Debido a que los software BIM se utilizan como herramientas de esta metodología, es importante definirlos adecuadamente. La Escuela de Diseño de Madrid ESDIMA (s/f) define al software BIM como:

“Un software que facilita el modelado de edificios en tres dimensiones y en tiempo real, incluyendo su geometría, la información geográfica, todos los elementos que lo componen, las relaciones espaciales existentes, las cantidades y propiedades de sus componentes, el coste, etcétera a lo largo de todo su ciclo de vida, desde la fase de boceto hasta su puesta en explotación, lo que supone alcanzar unos elevados niveles de optimización en tanto que disminuye el consumo de tiempo y de recursos. (s/f: 1)”

Existen muchos software que cumplen con lo mencionado previamente, que son capaces de integrar diferentes tipos de tareas. Uno de ellos, es Revit, el cual es definido por Hildebrandt gruppe (2015) como un software de modelado que permite diseñar el modelo de la estructura desde fases iniciales hasta otras fases en las que se tenga mayor información, en otras palabras, es una herramienta que permite construir el edificio de manera virtual.

Revit permite detalles en muros, pisos, calcular áreas, experimentar con materiales y colores. Además, al ser un software inteligente, cualquier cambio en algún elemento, permitirá una actualización en diferentes elementos que dependan de aquel que fue cambiado o que sean de la misma familia. También, se pueden estimar costos, a partir de las vistas en 3D de los elementos, se pueden realizar metrados como por ejemplo del movimiento de tierras, del acero,

etc. Estos metrados se pueden realizar a partir de la sectorización por niveles o de vistas de detalle.

Cada objeto de Revit incluye parámetros que permite al usuario asignar una fase al objeto (que puede ser una fecha o una etapa del proyecto), para luego aplicar filtros para mostrar los objetos que pertenecen a una determinada fase y así obtener una mejor visualización.

En resumen, Revit u otros programas de diseño como Tekla permiten diseñar el proyecto desde cero, realizar modificaciones al proyecto, representar y realizar simulaciones de las diferentes fases del proyecto. Así como también, fomenta la colaboración de los diferentes participantes del proyecto al contar con funcionalidades propias para cada disciplina para que todos trabajen en una misma plataforma y visualicen el trabajo conjunto en la simulación 3D para obtener una visión más absoluta del proyecto. (Renders Factory, 2018)

2.1.4 Impacto de BIM en el diseño, construcción y operación

Como se ha mencionado a lo largo del documento, BIM busca cambiar la forma tradicional de construcción de edificios mediante un modelo basado en la colaboración temprana de los diversos profesionales que participan normalmente en estos tipos de proyectos, de esta forma se quiere dar valor a la idea del cliente y buscar múltiples alternativas de construcción.

El trabajo colaborativo radica en que cada participante puede crear sus propios modelos y que deben ser combinados, analizados y corregidos según conforme avancen el resto de integrantes del equipo. Esto ayuda a minimizar los retrasos o tiempos de espera y a comprimir el tiempo total de trabajo. La figura 6 muestra la diferencia entre el modelo de construcción convencional (izq.), en la que no existe una reunión que integre a todos los participantes, sino que más bien cada uno busca realizar su trabajo de manera independiente, con el modelo propuesto por BIM, en la que esta plataforma reúne los aportes de todos los integrantes del proyecto.

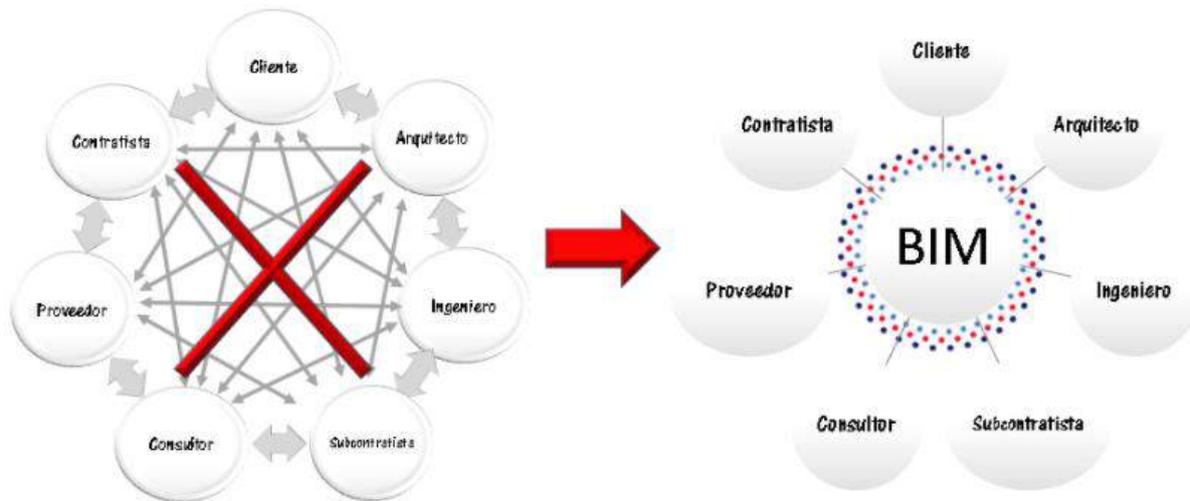


Figura 6: Intercambio de información con BIM y sin BIM

Adaptado de Allen Consulting Group (2010). BIM: INFORMATION EXCHANGE

El contratista ya no solo se dedica a construir lo diseñado por el arquitecto o el ingeniero estructural sino que más bien aporta en la etapa de diseño ideas para facilitar la construcción o errores comunes que se presentan durante la obra, todo en base a su experiencia.

El cliente, el cual siempre estuvo relegado a resolver problemas de financiamiento o retrasos en la obra, ahora desempeña un rol fundamental, pues es el encargado de definir el alcance del proyecto y de transmitir el producto al equipo de trabajo. Realizar esta etapa adecuadamente ayudará a reducir los riesgos durante el proyecto, mejorar la calidad del proyecto y darle valor al producto del cliente.

También, los arquitectos y los ingenieros estructurales encargados del diseño deben trabajar de manera coordinada lo antes posible para reducir el tiempo de diseño, evitar interferencias entre los elementos, aprovechar la experiencia de ambos y superponer ideas para garantizar que la estética sea segura estructuralmente. Todo esto influye indirectamente en el costo y en el tiempo de ejecución de la obra, ya que se evitan futuros errores de compatibilidad en los planos y su consecuente modificación.

Antes de BIM, los planificadores realizaban los modelos en 4D de forma manual, utilizando equipos de dibujo para mostrar los avances de los trabajos en el tiempo. Luego, con la aparición de las herramientas de CAD se agilizaron los procesos y se incluyeron nuevas variantes como rellenos de colores, sombreados, capas para los objetos, entre muchas características que poseen el software CAD. Sin embargo, cualquier cambio o actualización con respecto a los planos involucraba volver a realizar el diseño en CAD, lo cual significaba tiempo y dinero.

Si bien se busca por medio de BIM de involucrar al contratista en las primeras etapas del proyecto, aun así esto no ocurriese, la empresa encargada de la construcción se puede beneficiar de las herramientas de BIM a partir de un modelado del edificio con la colaboración de subcontratistas, fabricantes o de un asesor que realice el modelo.

De acuerdo con el artículo de Koskela et al (2013), la principal función de BIM durante la etapa de construcción es la de minimizar las pérdidas y de proteger la producción de la incertidumbre. Esto ayuda a comprimir el tiempo total tomado y de mejorar la calidad y el valor para el cliente.

Algunas de las aplicaciones de BIM durante esta etapa que propone el artículo mencionado son las siguientes:

a) Detecciones de incongruencias:

Con la ayuda de BIM es posible reconocer incongruencias, como por ejemplo, cuando dos elementos ocupan el mismo espacio o cuando existen dos elementos que se encuentran muy juntos que impiden el acceso, mantenimiento o por seguridad. Incluso, para edificios modelados con un nivel apropiado de detalle, es posible encontrar las incongruencias entre dos sistemas diferentes como estructuras y el sistema eléctrico, además, es posible colocar ciertas condiciones como encontrar elementos de estos dos sistemas que se encuentren separados 2 metros.

Dentro de esto, es importante conocer el término LOD, que significa Level of Detail, este término es una medida de la calidad del elemento representado y de la información que se obtiene para desarrollar ese elemento del modelo. Por ejemplo, en la figura 7 se muestra una columna en la que solo se encuentra la base de la zapata y se observa el armazón de la columna (izq.), tendrá un LOD de 200. Sin embargo, en la imagen de la derecha el LOD será mayor porque existe más información sobre la columna y la unión con respecto de la zapata, además se observa que se encuentra definido la cantidad de acero, la distribución y la separación de estos. En este último caso, el LOD es de 300.

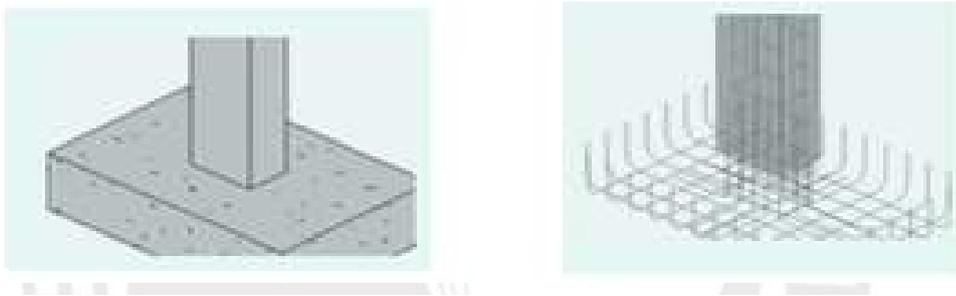


Figura 7: LOD o niveles de desarrollo

Adaptado de EspacioBIM (2016). ¿Qué es el LOD?. Tomado de: < <https://www.espaciobim.com/que-es-el-lod-nivel-de-detalle>>

b) Cantidades de salida y estimación de costos:

Este proceso se puede realizar para cualquier etapa del proyecto y se refiere a que con las herramientas de BIM es posible estimar los costos debido a alguna modificación en el proyecto. De esta manera, es posible comparar precios y si al realizar el cambio se está excediendo del presupuesto o no.

c) Análisis de constructabilidad y planeamiento (a través de las herramientas 4D):

Gracias a esta característica de BIM es posible mejorar la capacidad de construcción y la seguridad de la planificación, para ello, cada elemento del edificio y ensamblaje estructural

debe estar vinculado a alguna fase del proyecto. Además, se debe definir el tiempo y el orden según el cronograma del proyecto para estas tareas.

d) Integración con el costo y el cronograma

Normalmente, el llevar el control de la obra a través del cronograma y verificar los respectivos costos se realizan utilizando mucho tiempo por parte de los ingenieros, ya que deben utilizar diversos software y colocar la información necesaria manualmente. Actualmente, BIM facilita este trabajo ya que permite vincular diversos software y además provee un modelo gráfico para que los respectivos profesionales puedan observar posibles errores o analizar visualmente el progreso del proyecto.

e) Fabricación fuera del sitio

Es común que en las obras de construcción algunos de los componentes estructurales sean fabricados o ensamblados fuera de la obra para luego ser instalados. Con la ayuda de BIM, se incentiva la participación temprana de los subcontratistas en etapas tempranas del proyecto, tal como lo menciona Eastman et al (2011), es posible brindar detalles de los componentes como la geometría en 3D, especificaciones de materiales, secuencia de entrega antes y durante el proceso de fabricación y requisitos de acabado.

f) Verificación, dirección y seguimiento de las actividades de construcción

Cuando ocurre algún error en la obra, la empresa contratista debe invertir dinero y tiempo para corregir el error que se produjo. BIM permite observar que lo que se realiza exactamente en el campo sea lo que suceda en el modelo virtual. Por ejemplo, es posible verificar si los elementos se encuentran exactamente en la posición de diseño o si el concreto a vaciar se encuentra exactamente en el lugar que se requiere.

2.1.5 BIM para empresas contratistas:

La empresa contratista debe convencer al dueño o buscar a clientes que intenten involucrar al constructor desde la fase de diseño para lograr el mayor rendimiento de BIM. Sin embargo,

aun cuando esto no se cumpla, existen muchas ventajas que se pueden obtener luego de la etapa de diseño a partir de la elaboración del modelado del edificio. Estas se mostraron en la sección anterior, tales como la detección de choques, el uso de las herramientas 4D, estimaciones, reforzar la coordinación, entre otras.

La contratista en etapas tempranas, dependiendo de para qué quiere realizar el modelo, necesita cierto grado de detalle de la información del proyecto. Por ejemplo, tal como menciona Eastman et al (2011), para realizar un preciso estimado de costos, el modelo debe estar suficientemente detallado para proveer la cantidad de materiales necesarios para realizar la evaluación. Por otro lado, si se quiere realizar un análisis del cronograma se debe tener un menor nivel de detalle pero que aun así debe contener trabajos temporales y mostrar cuáles serán las fases de la construcción.

También, la metodología BIM recomienda que para lograr mayores beneficios para el contratista, es necesario que este incluya lo antes posible en el trabajo colaborativo a los subcontratistas y los fabricantes. Es necesario que cada uno de ellos utilice el modelo BIM para detallar sus partes del trabajo, de esta forma, se podrán detectar errores de compatibilidad y corregirlos lo antes posible para que no ocurran en el campo.

En cuanto a los enfoques de gestión tradicionales que se suelen utilizar en la construcción, el más beneficioso de acuerdo a BIM es el de entrega integrada del proyecto (IPD, por sus siglas en ingles). Este enfoque permite aprovechar la metodología BIM, ya que este requiere que arquitectos, diseñadores, cliente y constructores trabajen juntos desde el inicio del proyecto. Por otro lado, en el enfoque de diseño-licitación-construcción generalmente la empresa contratista no influye en el diseño y por ende, no participa brindando su conocimiento y experiencia en la construcción durante esta etapa.

2.1.6 Dificultades en la aplicación BIM:

Según el artículo Criminale and Langar (2017) de The University of Souther Mississippi “Challenges with BIM Implementation: A review of literature”, la mayoría de las dificultades de la implementación de BIM se encontraron a nivel de la organización. Por ejemplo, algunas de estas se relacionan con la capacitación de los empleados, la falta de estándares nacionales para BIM en los EE. UU., la administración de datos y la interoperabilidad del software. Además, otros problemas encontrados son el tiempo necesario para contratar y capacitar a las personas a usar BIM, así como el costo que significa implementar BIM, esto afecta a las pequeñas y medianas empresas al momento de la competitividad.

Otro artículo desarrollado por Ki Beom Ju y Myoung Bae Seo (2013), muestra los principales problemas que ellos encontraron en la aplicación de BIM (figura 8). Algunos de estos problemas son similares a los presentados por Criminale and Langar (2017) en el párrafo anterior, sin embargo, otros resultan nuevos. Por ejemplo, en el área de sistemas, los problemas presentados se deben básicamente a la resistencia al cambio por parte del personal y a la poca participación por parte del gobierno para mejorar algunas partes estratégicamente. En cuanto a las mejoras dentro del área de información, se observa que estos se deben al no desarrollo de información base necesaria para la aplicación de BIM, también, a la no mejora de algún software que ya existe para que se ajuste a BIM. Finalmente, en el área de la implementación de procedimientos para el proyecto, es necesario mejorar la colaboración de los participantes, cambiar equipos de trabajo y asignar tareas.

En la tabla 1, se observa que dentro del área de la implementación de procedimientos del proyecto y del área de análisis, los problemas surgen debido a que BIM influye al cambio en la organización de la obra, afecta directamente a los procedimientos usuales de trabajo, a las necesidades del personal y a cómo se maneja la información dentro de la empresa. Por eso, es necesario educar al personal de la empresa, capacitarlos y concientizarlos de los cambios que

se pueden lograr con esta metodología y los beneficios que se producen. El AEC (2014), una industria de arquitectura, ingeniería y construcción en el Reino Unido, recomienda que particularmente las grandes empresas en la que la estructura organizativa y las ubicaciones dispares provoquen que la comunicación sea complicada deben comenzar su lanzamiento de BIM con una serie de presentaciones corporativas, adaptadas a los diferentes niveles de personal, explicando las razones para considerar la transición a BIM.

Tabla 1: Clasificación de problemas

Problemas	Area
<input type="checkbox"/> Falta de sistema de apoyo en el proceso de tareas necesario para la aplicación de BIM, falta de viabilidad en el modelo de diseño, falta de voluntad para realizar cambios, falta de sistema de colaboración y mente de colaboración	<input type="checkbox"/> Área de procedimientos de implementación del proyecto
<input type="checkbox"/> Falta de biblioteca de archivos, falta de datos compatibles, falta de estandarización, falta de clasificación de objetos, falta de información reciclada	<input type="checkbox"/> Información
<input type="checkbox"/> Falta de profesionales, falta de políticas nacionales, falta de métodos y sistema de evaluación / verificación de datos BIM	<input type="checkbox"/> Sistema

Adaptado de: “A Study on the Issue Analysis for the Application of BIM Technology to Civil Engineering in Korea”. (Ju & Bae Seo; 2012). Classification of Problems and Improvement.

También será necesario que los profesionales entiendan el concepto BIM y no lo asocien simplemente como un software similar al CAD, pues es posible que pierdan interés en el significado real de la metodología y lo utilicen como usaban la herramienta CAD obteniendo posiblemente resultados deficientes. Además, las empresas suelen pensar que se perderán horas productivas capacitando al personal, sin embargo, es necesario que estas entiendan que la productividad obtenida producto de la aplicación de BIM recuperará rápidamente la inversión en costo y en tiempo para la capacitación del personal.

En cuanto a la necesidad de estándares, esto no solo es un problema en cuanto a BIM, sino en general. Muchas medianas y pequeñas empresas no utilizan estándares para los formatos en

cuánto a la planificación en los proyectos. El artículo llamado “The Importance of BIM Standards” de Beesley (2014) menciona que la importancia de los estándares radica en que garantizan la continuidad del proyecto y brindan al propietario del proyecto el formato que desea. Además, brinda un gran impacto positivo en la productividad y garantizan que la implementación de BIM sea sostenible.

Por otro lado, en cuanto a la administración de datos se refiere, existe mucha desinformación o desconocimiento en cuanto a en qué momento del proyecto los profesionales de cada rama obtendrán la información necesaria para realizar su respectivo aporte en el modelado del edificio. Una interesante encuesta realizada por Rui Lio & Raja R A Issa (2013) de la Universidad de Florida para recopilar perspectivas de 32 profesionales de la industria de instalaciones para los requisitos de datos en las fases de diseño y construcción muestra algunos de los siguientes resultados:

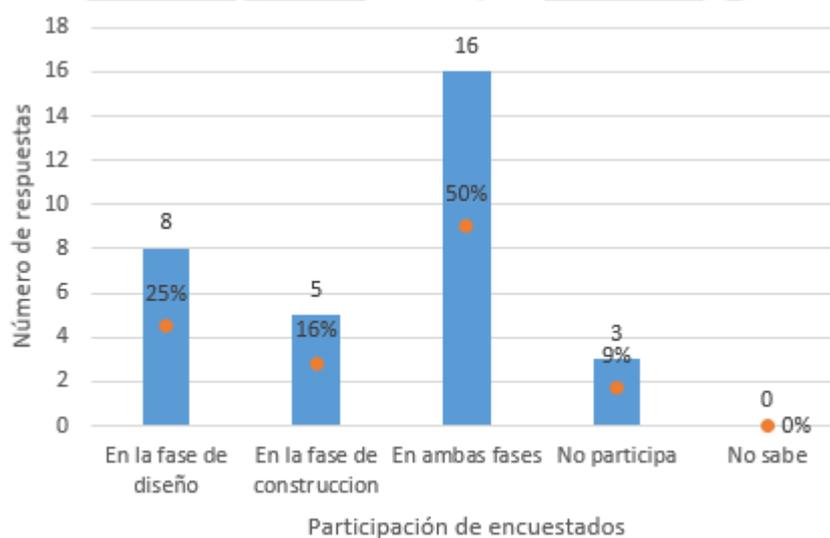


Figura 8: Personal de gestión de instalaciones involucrados en la fase de diseño y construcción.

Adaptado de Issues in BIM for facility management from industry practitioners perspectives (2013). Personnel Involvement in Design and Construction Phases. (Liu. R & Raja R A Issa, 2013)

Esta gráfica muestra los resultados obtenidos para el área de gestión de instalaciones. Como se observa, el 50% de los entrevistados considera que los problemas de mantenimiento se deben considerar en ambas fases, tanto para diseño como para la construcción; el 25% que se debe ejecutar en la fase de diseño, mientras que 15.6% en la fase de construcción. Esta encuesta

lleva a considerar que existe una brecha en la implementación BIM con aquellos profesionales que se encargan de la administración de instalaciones y que estos no se encuentran capacitados de en qué momento aportar al modelado de información.

Finalmente, otro problema muy importante de considerar es la interoperabilidad entre los software BIM, es indispensable que los desarrolladores de software encuentren la forma de solucionar problemas de compatibilidad para así cumplir con la principal función de BIM, que es la colaboración en los proyectos. Entre los problemas usuales al momento de proporcionar interoperabilidad entre los software se encuentran la pérdida de información, pérdida de coordenadas compartidas, problemas entre los formatos, entre otros.

2.2 Lean Construction

2.2.1 ¿Qué es Lean Construction?:

Lean Construction es una metodología que surge como una adaptación del Lean Production pero orientado al sector de la construcción. Lean Production es una filosofía aplicada con mucho éxito por la famosa marca japonesa de autos Toyota, a partir de la cual se buscaba reducir al máximo los desperdicios y agregarle valor al producto deseado por el cliente.

Womack y Jones (1996) definieron 5 principios básicos para esta metodología:

- 1) Valor: Es importante identificar el valor del producto que se está elaborando para los clientes o para el consumidor final. Se debe buscar que este último se encuentre satisfecho con el producto y que sea exactamente lo que él buscaba o que satisfaga su necesidad.
- 2) Flujo de valor: Es el segundo paso del pensamiento Lean, se debe identificar la totalidad del proceso que lleva hasta el producto final, es decir, desde la concepción de la idea del producto, su diseño y luego la transformación de la materia prima hasta el producto acabado en manos del consumidor. Se logrará reconocer procesos fundamentales que

crean valor, procesos que no crean valor pero que son necesarios y procesos que no crean valor alguno y pueden evitarse. Debe existir una relación entre todos los participantes involucrados para la obtención del producto desde su concepción, debe existir, además, transparencia entre las firmas y que cada participante pueda corroborar que el otro lo está desarrollando de manera adecuada.

- 3) Flujo: Luego de los dos pasos anteriores, se deben ejecutar los procesos de las etapas creadoras de valor. Esto amerita un cambio en la mentalidad de la empresa. Se debe buscar la creación de un flujo continuo constante en la producción y no que se maneje esta en base a lotes de producción de grandes tamaños.
- 4) Pull: El cliente debe “atraer” el producto en base a sus necesidades. Esto es a diferencia del método Push que consiste en “empujar” el producto, es decir crear productos que muchas veces no son deseados. Es un esfuerzo de los participantes por producir la demanda necesaria del producto requerida por los clientes.
- 5) Perfección: Se deben establecer controles de calidad, así como instrucciones y procedimientos para un desarrollo de trabajo adecuado. Un estímulo importante es la transparencia, todos los involucrados deben conocer los procesos para llevar a cabo el producto y así se descubran mejores metodologías para crear valor.

Luego, debido al éxito en la empresa japonesa de Lean Production, fue Lauri Koskela (1992) quien condujo un estudio en la Universidad de Stanford llamado “Applications of The New Production Philosophy to Construction”, en la que veía a la Construction como una forma de producción. El propio Koskela (1992) define Lean como *“una manera de diseñar sistemas de producción para minimizar el desperdicio de materiales, tiempo y esfuerzo para generar la máxima cantidad de valor posible”*.

Es interesante también la definición sobre Lean que le da el Lean Construction Institute (LCI) (s/f), quienes vieron lean Construction como “una nueva manera de gestionar la construcción.

Esta nueva forma de gestionar la construcción da mejoras significativas en proyectos complejos, inciertos y rápidos”.

Además, el Construction Industry Institute (CII) (2005) define Lean Construction como “el proceso continuo de eliminar el desperdicio, cumpliendo o superando todos los requisitos de los clientes, enfocándose en la totalidad del flujo de valor y purificando la perfección en la ejecución de un proyecto de construcción”

A partir de las definiciones presentadas, está claro que Lean Construction es una metodología que para lograr sus objetivos debe involucrar herramientas, métodos o técnicas que produzcan un cambio a comparación de la manera convencional de construir edificios. Entre los beneficios que esta metodología presenta se encuentra menores costos, reducción de demoras, reducir la incertidumbre, reducir los desechos, incrementar la satisfacción del cliente y procesos más eficientes.

El Construction Industry Institute CII identificó 5 principios del Lean Construction:

- Enfoque en el cliente
- Cultura y gente
- Organización del trabajo y estandarización.
- Eliminación de residuos
- Mejora continua y calidad incorporada

Además, un documento realizado por Lichtig (2005) explica las 5 grandes ideas que definió el Lean Project Consulting de cómo mejorar los procesos para realizar los trabajos.

- 1) Colaborar, realmente colaborar: Se debe reducir las brechas entre los diseñadores, constructores, subcontratista ya que la colaboración cercana de este equipo ayuda a tomar mejores decisiones y resultados en relación al diseño y opciones de construcción.

- 2) Incrementar las relaciones entre todos los participantes del proyecto: Una buena relación entre los participantes del proyecto promueve la confianza y el aprendizaje, así como la voluntad de innovar.
- 3) Los proyectos son redes de comisiones: Se busca que los integrantes del equipo sean capaces de dirigir y gestionar en tiempo real los proyectos. Es la gerencia del proyecto la encargada de crear conexiones entre los participantes del proyecto.
- 4) Optimizar el proyecto, no las piezas: Se debe evitar el sistema Push porque reduce la predictibilidad del trabajo futuro. Esta falta de confiabilidad en el trabajo genera que los proyectos duren más y complica la coordinación.
- 5) Acoplar la acción con el aprendizaje: Esta idea propone que el trabajo se realice como un flujo y que facilite la observación de resultados específicos.

2.2.2 Lean Project Delivery System: metodología y aplicación en diferentes etapas de aplicación.

El Lean Project Delivery System (LPDS) fue desarrollado por Glen Ballard en el año 2000 y es una metodología con 3 metas fundamentales (Koskela 2000):

- Entregar el producto
- Reducir las pérdidas
- Maximizar el valor

Se desarrolló para reducir los problemas que se generan en el sector de la construcción debido a pobres diseños y poca calidad en los documentos, tales como excesos de presupuestos, retrasos en el cronograma, trabajos rehechos y variaciones. Además, busca que exista un control de la producción desde la etapa de pre diseño hasta la entrega del proyecto.

Tal como se menciona en el libro *Modern Construction: Lean Project Delivery and Integrated Practices* de Forbes & Ahmed (2011), el modelo LPDS mejora la entrega del proyecto a través de las siguientes características:

- 1) Temprana participación de todos los involucrados en el proyecto
- 2) Se enfoca en detectar las variaciones antes que en corregirlas luego de que estas ocurran
- 3) Las técnicas del modelo Pull se aplican para controlar el flujo de materiales e información
- 4) Se utilizan los buffers para absorber la variabilidad
- 5) Se incorpora la retroalimentación en cada nivel del proyecto

Ballard & Howell (2003) definen 5 fases para esta metodología que incluyen su correcta aplicación para toda la etapa del proyecto:

- 1) Definición del proyecto: Es la primera de las fases, en la que se define el alcance del proyecto y por ende, deben involucrarse todos los participantes del proyecto para entender las necesidades del cliente. Se divide en 3 fases: determinación de necesidades y valores, criterio de diseño y diseño conceptual.

En la primera de ellas, se define el propósito del proyecto y las necesidades que se satisficieran con este. En la segunda fase, se define el cómo se va a ejecutar el proyecto. En el diseño conceptual, se plasma en documentos lo requerido por el cliente y da paso a la siguiente fase de la metodología del LPDS.

- 2) Diseño Lean: Los métodos tradicionales suelen separar el diseño de la construcción, generalmente se limita mucho al constructor y este tendrá menos facilidades en cuanto a la forma de construcción, esto induce al error y provoca re trabajos. Se propone que para una mayor eficiencia en el producto, las partes involucradas participen en el diseño para así elijan las mejores opciones para el proceso de diseño y el diseño del producto. De esto se encarga el Lean Design management, una metodología que promueve la

implementación de la filosofía Lean durante el diseño y el proceso de construcción, así como nuevas tecnologías, tal es el caso de BIM.

- 3) Suministro Lean: Abarca desde el diseño del producto, ingeniería detallada y finalmente, la fabricación y logística. Los problemas asociados a esta etapa pueden ser falta de materiales en almacén o exceso de materiales en el lugar, lo que afecta a que se acumulen reduciendo el espacio y creando peligro. Estos problemas, generan importantes retrasos en el cronograma y en el aumento del costo debido al retraso. Forbes & Ahmed (2011) proponen 3 enfoques para solucionar estos problemas, estos son asegurar la confiabilidad en el flujo del trabajo a través del reconocimiento y la eliminación de las restricciones, utilizar software de gestión de proyectos para incrementar la transparencia usando flujos de valor, y vinculando el flujo de trabajo con el suministro de material.
- 4) Montaje Lean: En este caso, los objetivos se cumplen a través de cronogramas que se crean a partir de utilizar las herramientas del Last Planner System que se mostrarán más adelante.
- 5) Uso: Abarca la entrega, operaciones y mantenimiento, futuras alteraciones.

2.2.3 Revisión de las herramientas del Lean Construction:

Como ya se mencionó en el punto anterior, el Last Planner System (LPS) es una importante herramienta del Lean Project Delivery System (LPDS). Lo que se busca con el último planificador es disminuir la variabilidad en la ejecución de la obra al aumentar la confiabilidad en las programaciones. Según, Forbes and Ahmed (2011) los principios del LPS son:

- El planeamiento será más detallado conforme más cerca se esté del trabajo
- Los planeamientos se realizan con aquellos que realizarán el trabajo
- Las restricciones se identificarán y luego se removerán gracias al esfuerzo del equipo

- Las fallas se tomarán como una oportunidad para aprender y no para acciones negativas

Este enfoque consta de 4 niveles de cronogramas:

1) El cronograma maestro o Master Schedule:

Es un programa en el que se muestra las fases principales de todo el proyecto o hitos del proyecto. Es este cronograma el que se suele utilizar para realizar las gestiones con el cliente o para seguir con el avance de la obra.

La desventaja del plan maestro es que en la mayoría de ocasiones es realizado por personas que no realizarán el trabajo. Además, es seguido con mucho cuidado por parte de los encargados de llevar a cabo la construcción pues de este depende el acuerdo inicial con el cliente. En los proyectos Lean, se sugiere involucrar a las personas que realizarán el trabajo para detallar el plan maestro en un Look Ahead, programación semanal y una programación diaria.

Se aplica un enfoque basado en la técnica Pull, en la que los “últimos planificadores” se encargarán de realizar una programación inversa desde la fecha de finalización esperada, en la cual se verificará la ruta crítica (actividades de cuya duración depende la duración del proyecto) y se añadirán ciertos márgenes de tiempo para evitar la incertidumbre y el riesgo. Esta programación inversa junto con el cronograma maestro indica qué trabajo se debe hacer primero para cumplir con el calendario.

2) Look Ahead:

El Look Ahead es un cronograma flexible de aproximadamente 6 a 8 semanas y que se obtiene a partir de los ítems del Master Schedule, lo que se busca es asegurar el flujo de trabajo y reducir la incertidumbre. En este cronograma se identifican aquellas actividades que pueden

ser realizadas, es por ello que se debe consultar con los capataces o con el maestro de obra sobre las actividades en las que se hayan cumplido los requisitos previos, que exista disponibilidad de material y disponibilidad de mano de obra.

Según Ballard y Howell (2003) el propósito del Look Ahead es:

- Para que exista una secuencia y un flujo de trabajo
- Controlar el flujo de trabajo y la capacidad
- Desarrollar planos detallados sobre cómo se realizará el trabajo

Para aprovechar al máximo esta herramienta, es necesario realizar un análisis de restricciones, esto implica identificar aquellas actividades que puedan ser realizadas dentro del rango de tiempo para el cual se elaboró el Look-Ahead. Además, cada semana el equipo del proyecto debe revisar los procesos que le siguen evitando que existan restricciones, también se deben realizar modificaciones al programa en caso no se hayan cumplido las expectativas para cada semana o en caso haya surgido algún imprevisto dentro de la obra.

3) Plan semanal:

Esta programación se obtiene del Look-Ahead y se incluyen aquellas actividades que se encuentran sin restricciones. Es importante que las personas encargadas de elaborar el Look Ahead hayan elegido las actividades con las que se cuenten los recursos disponibles y con la mano de obra necesaria para llevarlas a cabo. A diferencia del Look-Ahead, en este caso existe un mayor detalle en las actividades para cumplir cada ítem.

Algunos criterios para aplicar en la programación semanal son los siguientes:

- La información en el programa debe encontrarse adecuadamente detallada para que sea gestionada por un capataz.

- La información debe ser clara, se debe conocer lo que se necesita para llevar a cabo las tareas, además, estas deben ser factibles y no se debe abusar de la productividad de la mano de obra.
- Se debe cuestionar si las tareas son aquellas que se encuentra en orden de prioridad y de trabajabilidad
- También, se debe cuestionar si las tareas se asignan en base a la productividad de la mano de obra
- En caso de que exista alguna tarea que no se halla llevado a cabo, será necesario evaluar el por qué no se realizó para evitar errores futuros en otras actividades.

4) Programación diaria:

Es la última etapa de programación que propone el sistema del último planificador, esta programación se obtiene a partir de la programación semanal y se la debe elaborar con el apoyo de los involucrados directamente con el trabajo en campo. Es posible que el maestro de construcción o los respectivos capataces junto con el ingeniero de producción sean los encargados de programarlo. Es importante también que la información sea transmitida a todo el personal de campo para que estos sean conscientes del trabajo que se va a realizar y lo ejecuten de manera adecuada.

Una manera de elaborar este plan para que sea entendible por el personal es elaborando gráficos o pequeños planos en los que se seleccionen las áreas en las que se ejecutaran los trabajos y el personal obrero para cada actividad. Además, en el caso de tener actividades que son repetitivas durante mucho tiempo, es posible colocar incluso los horarios de término para cada actividad. Por ejemplo, una actividad que es repetitiva en la construcción es la de muros pantalla, entonces, es posible que se elabore esta programación diaria y se coloque que de 8 de la mañana a 11 de la mañana se realizará el encofrado del muro pantalla y será elaborado por tales

personas, para luego realizar el vaciado por otra cuadrilla de 11 de la mañana hasta la 1 de la tarde, y así para el resto de actividades.

a) Porcentaje del plan completado (PPC): Como su nombre lo dice, representa el porcentaje de avance que existe hasta un momento dado del plan asignado y se muestra de manera gráfica. El PPC lo que muestra es la eficiencia en la programación de producción y que se verifique si se realiza o no un adecuado flujo de trabajo.

La fórmula para hallar el PPC es la siguiente:

$$PPC (\%) = \frac{\text{Cantidad de compromisos cumplidos}}{\text{Cantidad total de compromisos}} \times 100$$

Ecuación 1: Fórmula para la obtención del porcentaje del plan completado

Esta herramienta se suele utilizar para hallar la confiabilidad del plan semanal y la evolución del sistema a lo largo del proyecto.

b) Sectorización:

La sectorización es una herramienta de la filosofía Lean que consiste en dividir el área de trabajo en diferentes sectores para los cuales se obtengan áreas similares con la finalidad de obtener metrados similares tanto para acero, concreto, encofrado, así como los diferentes trabajos de acabados, etc. De esta manera, será posible balancear las diferentes cuadrillas para obtener volúmenes de producción similares. Además, se reducirán los tiempos muertos o tiempos de espera.

Otra ventaja de la sectorización, es que una misma cuadrilla es la encargada de realizar el mismo trabajo, por lo que se logra una continuidad o repetitividad. Esa cuadrilla, al realizar el mismo trabajo durante un tiempo determinado logrará perfeccionar los procesos constructivos

y mejorará su rapidez (se genera una curva de aprendizaje). Será importante, si no se llega a cumplir con la tarea, analizar la razón de por qué no se cumplió con el objetivo y la cuadrilla no vuelva a presentar este problema en el siguiente trabajo. Un ejemplo de sectorización es el que muestran Guzmán & Suarez (2011) en el Capítulo Peruano del Lean Construction y se muestra a continuación:

Como se observa en la figura 9, se dividió el área de la obra en áreas similares. Así se obtendrán volúmenes de producción similares. La sectorización da paso a la siguiente herramienta llamada tren de actividades.

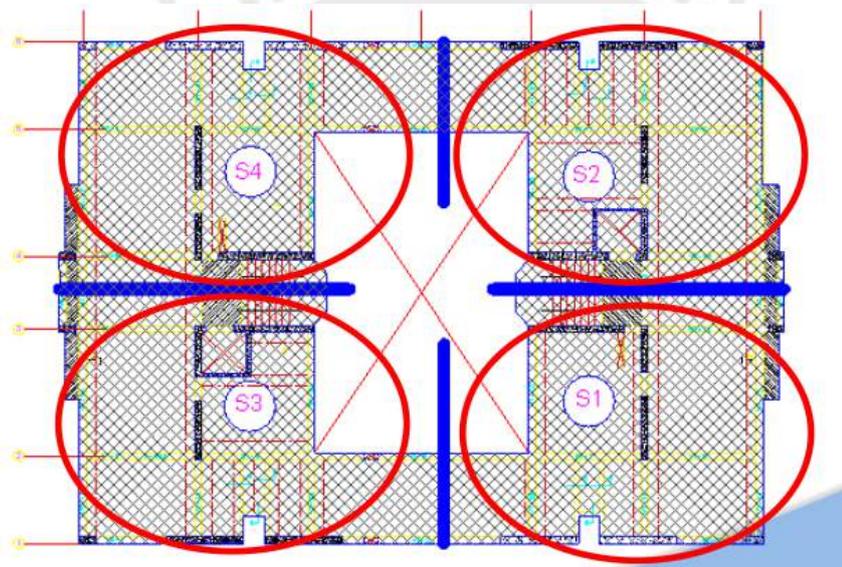


Figura 9: Ejemplo de sectorización.

Adaptado de La Filosofía “Lean Construcción”. (Guzmán & Suárez; 2011) parte i- Edifica. Capítulo Peruano del Lean Construction Institute (LCI). Ejemplo de sectorización

Es una herramienta que organiza una secuencia para las diferentes cuadrillas de la obra en la que se busca que todo el personal de campo se encuentre siempre realizando alguna actividad productiva en los sectores definidos durante la sectorización. El tren de actividades busca que la secuencia de trabajo sea repetitiva y que no existan tiempos de espera.

En la figura 10 se observa lo explicado previamente, existe una secuencia de actividades y también se observa que diferentes cuadrillas trabajan en diferentes sectores de la obra.



Figura 10: Presentación pucp lean construction

Adaptado de La Filosofía “Lean Construcción”. (Guzmán & Suárez; 2011) parte i- Edifica. Capítulo Peruano del Lean Construction Institute (LCI). Ejemplo de tren de actividades

d) Buffers

Los *buffers* son herramientas o estrategias que se utilizan en la industria de la construcción con la finalidad de que sea un “salvavidas” en caso de alguna variabilidad en la obra o en caso ocurra algún suceso no previsto que afecten a los procesos constructivos generando pérdidas en costos o retrasos en el tiempo.

A continuación se explican 3 tipos de buffers:

- **Buffer de inventario:** Se le llama así a un exceso generado a propósito en la cantidad de materiales o equipos. Es muy común utilizarlo en los proyectos de construcción, siempre es bueno utilizar esta herramienta ante posibles casos de mala organización por parte del área de producción al momento de necesitar materiales o realizar requerimientos de equipos, así como el no cumplimiento por parte de algún proveedor en la fecha requerida.

Por otro lado, existe un método conocido como el Justo a tiempo (JIT, por sus siglas en inglés), el cual es una organización de la producción que busca reducir el costo de la

gestión y busca reducir las pérdidas generadas en los almacenes. Esta busca realizar pedidos reales, es decir, se produce la cantidad que se necesita en el momento adecuado

A partir de lo presentado, estos dos métodos se diferencian en que el primero busca generar un exceso en la cantidad de materiales para evitar situaciones en las que no se cuenten con los materiales en el momento debido y que generen posibles retrasos. En cambio, el segundo método, a partir de una buena organización en el área de producción y de la aplicación de métodos, intenta ahorrar y evitar este exceso de materiales.

- **Buffer de tiempo:** Este tipo de buffer es muy importante y además, son bastante comunes. En muchos casos, se los utiliza como un periodo adicional para poder terminar el proyecto en caso surgiera algún imprevisto. Por ejemplo, si 5 pasos son necesarios para terminar una obra y cada paso dura 2 días, al momento de realizar el contrato se colocará para cada paso la duración de 3 días en caso surja alguna variación que ponga en riesgo la fecha de entrega del proyecto, por lo que se tendrá siempre un margen mayor para cada paso. Otro ejemplo, es que al momento de realizar las programaciones se cuenten 5 días por semana, entonces se utiliza el día sábado como un día adicional para terminar algunas actividades que no hayan sido realizadas o para adelantar otras actividades.

Por otro lado, se puede contrastar este tipo de buffer con la necesidad por parte de los clientes de obtener el producto final en el menor tiempo posible y con la competitividad de las empresas por obtener la licitación de la obra. Actualmente, debido a que la edificación es una buena inversión, existen muchas compañías de construcción por lo que esto provoca una gran competencia que obliga a reducir los costos de los proyectos y también los plazos de construcción. (Ruano, 2010)

En ese mismo sentido, se busca entregar el servicio rápido y de calidad para satisfacer al cliente pero el colocar un exceso de los buffer de capacidad, puede provocar que al momento de competir con otras empresas, estas liciten con cronogramas más ajustados y sean las que el cliente elija para llevar a cabo la construcción. Es por ello, que se necesita un adecuado planeamiento para evaluar en qué casos se puede colocar el buffer para que la empresa pueda competir con sus similares.

- Buffer de capacidad: Este tipo de buffer también es importante y se utiliza en muchos casos como un soporte en caso exista algún inconveniente para una actividad determinada. Por ejemplo, la cuadrilla de obreros encargada del encofrado no llegó a terminar de encofrar una losa al tiempo esperado y hay un volumen de concreto esperando a ser vaciado. Entonces, se utiliza el buffer, en este caso podría ser algún otro elemento que no se haya vaciado con la finalidad de utilizarlo en un momento oportuno.

Como se ha explicado, los buffers son muy importantes y de gran ayuda para evitar sobrecostos y retrasos. Si bien no siempre serán una solución para eliminar la incertidumbre, sí son capaces de aminorar sus efectos. Como cada proyecto es independiente y único, es importante que el equipo de la obra busque generarse sus propios buffers.

2.2.4 Integrated Project Delivery (IPD):

El IPD es un enfoque de gestión de proyectos que busca que se integren los participantes del proyectos, las empresas y que trabajen en un entorno colaborativo para optimizar los resultados del proyecto, acortar y maximizar la eficiencia del proyecto en todas sus fases, reducir el desperdicio y agregar valor para el cliente. (AIA California Council, 2007).

Según Eastman et al (2011), el enfoque IPD está ganando popularidad debido al uso de BIM. Esto se da porque uno de los principios de BIM es cambiar las interacciones entre los diferentes

profesionales de la construcción a partir de la colaboración temprana entre ellos. Precisamente, el enfoque IPD busca una colaboración temprana que debe iniciar en la etapa de diseño y se debe seguir aplicando hasta la entrega del proyecto. La clave del enfoque se encuentra en que los equipos del proyecto trabajan de manera conjunta utilizando herramientas colaborativas como las que se han mostrado a lo largo de la tesis y aseguran que el proyecto reduzca tanto los costos como el tiempo, así como satisfaga las demandas del cliente.

Es muy importante la participación del cliente durante este enfoque, incluso, algún consultor que represente los intereses del dueño debe ser parte del equipo de trabajo para ayudar a la gestión del proceso. Además, es fundamental que el principal interesado deba entender el proceso, participar en las reuniones e informar a los equipos de trabajo lo que deben lograr y cómo lo van a lograr.

Según el American Institute of Architects (2003), para lograr el máximo beneficio del enfoque IPD es necesario seguir los siguientes principios:

- Respeto mutuo y confianza: Entre los participantes se encuentran el cliente, diseñadores, constructores, consultores, subcontratistas. Es por ello que para garantizar el éxito en el proyecto, todos deben entender el valor de la colaboración y comprometerse para trabajar en equipo.
- Beneficio mutuo y recompensa: Al final, todos los participantes se ven beneficiados por la colaboración en este enfoque, ya que al realizar un trabajo conjunto se garantiza la reducción de errores en el proceso de diseño y además, se establecen relaciones laborales entre ellos.
- Innovación colaborativa y toma de decisiones: Al ser una colaboración entre profesionales de distintas ramas, cada uno aporta ideas sobre cómo realizar el trabajo

fomentando la innovación. Las ideas se eligen por unanimidad, la elegida es posiblemente la mejor forma de llevar a cabo el respectivo proceso de construcción.

- Participación temprana de participantes claves: Es importante que los participantes tomen las decisiones en base a su conocimiento y experiencia y que estas sean durante las primeras etapas, en las cuales las decisiones generan mayor relevancia.
- Definición de la meta temprana: Los objetivos del proyecto se desarrollan temprano en el proyecto, se establecen los objetivos e importancia de cada participante
- Planificación intensificada: Se busca un mayor esfuerzo durante la planificación, para así lograr mejores resultados de diseño y reducir los costos y pérdidas durante la etapa de construcción
- Comunicación abierta: La comunicación entre los participantes debe ser abierta, clara y honesta. Además, las responsabilidades están definidas y en caso de alguna disputa se busca identificar y resolver el problema, no a buscar un culpable.
- Tecnología apropiada: Se deben especificar tecnologías que mejoren los rendimientos del proyecto para maximizar la funcionalidad, generalidad e interoperabilidad. Como por ejemplo, el uso de diferentes software BIM.
- Organización y liderazgo: El equipo del proyecto es una organización y cada integrante es importante y posee sus propias responsabilidades. El liderazgo lo debe asumir el miembro con mayor capacidad y servicios específicos.

2.2.5 Target Value Design (TVD)

Es una metodología que busca generar el máximo valor al producto del cliente a partir de la colaboración en el diseño del producto de constructores, proveedores, propietario y diseñadores. En lugar del proceso tradicional de realizar una estimación del presupuesto y luego rediseñar para eliminar excesos, en este caso, el equipo es el encargado de diseñar para luego definir el presupuesto.

El TVD propone que los diseñadores evalúen la constructabilidad en sus diseños, es decir, que durante el desarrollo de la ingeniería, se estudie el proceso constructivo, se evalúen vías de acceso, posicionamiento de grúas, condiciones de seguridad para el equipo de trabajo, etc. Lo que se realiza tradicionalmente es que se le exige al constructor cómo va a construir a partir de un diseño ya realizado para luego sea el propio equipo de diseño quienes verifiquen esto, los cuales, en muchos casos, no poseen la experiencia necesaria para decidir sobre cómo construir.

Además, en lugar de revisiones periódicas sobre el diseño, se propone un diseño continuo con diferentes disciplinas participando durante esta etapa y que se muestren soluciones para posibles problemas que puedan ocurrir durante la construcción y así reducir variaciones que generen sobrecostos y retrasos en el cronograma.

Howell y Barberio (2005) propusieron un número de puntos de cómo aplicar el TVD:

- 1) Desarrollar una comunicación efectiva y a tiempo del desarrollo del producto. Aquí, según los autores, se deben elaborar reuniones en un ambiente apropiado en el que se incluyan gráfico, imágenes que representen los hitos, el progreso actualizado, acciones o recomendaciones para resolver algunos problemas o procesos técnicos.
- 2) Trabajar de cerca con el cliente para darle valor al producto, los diseñadores deben asegurarse de que el cliente sea un personaje activo durante este proceso y no un simple espectador.
- 3) Una vez establecido el valor del producto, el equipo de diseño debe realizar un estimado detallado del costo del proyecto y se deben ajustar aquellos elementos que presenten desviaciones y que corran el riesgo de no ser aceptados.
- 4) Realizar un trabajo colaborativo en el que se encuentren arquitectos, ingenieros, contratistas y subcontratistas para diseñar el producto y el proceso para diseñarlo. Aplicar innovación durante esta etapa.

- 5) Trabajar en grupos reducidos pero eficientes, aplicar el enfoque “pull”.
- 6) Realizar el calendario del proyecto mediante una colaboración entre todos los participantes. Estas prácticas coordinadas ayudaran a reducir re trabajos, retrasos y diseños mal elaborados.
- 7) Motivar al equipo de trabajo para la innovación y el aprendizaje. Realizar un replanteamiento en caso existan eventos no previstos inicialmente.
- 8) Elaborar reuniones sobre los resultados, se debe buscar incluir a todos los participantes con la finalidad de aumentar el conocimientos.

En general, para poder desarrollar adecuadamente esta metodología, es necesario que los arquitectos o ingenieros encargados del diseño posean la capacidad de orientar su trabajo a la constructabilidad y se encuentren dispuestos a recibir críticas o cambiar sus diseños para facilitar incluso los costos. Además, el equipo de trabajo del constructor debe contar con profesionales que sean capaces de elaborar estimaciones a partir de dibujos preliminares. Finalmente, el cliente o su equipo deben encontrarse capacitados para elaborar comentarios sobre como equilibrar los costos a partir de las características propias de la estructura.

2.2.6 Set-Based Design:

Es una metodología aplicada en su momento por la empresa Toyota, la cual mantenía un conjunto de opciones durante el desarrollo del diseño, a partir de las cuales evaluaba cuál era la mejor opción para sus procesos. De esta manera se logra que exista flexibilidad a la vez que se reducen los costos.

Point Based vs. Set Based Design

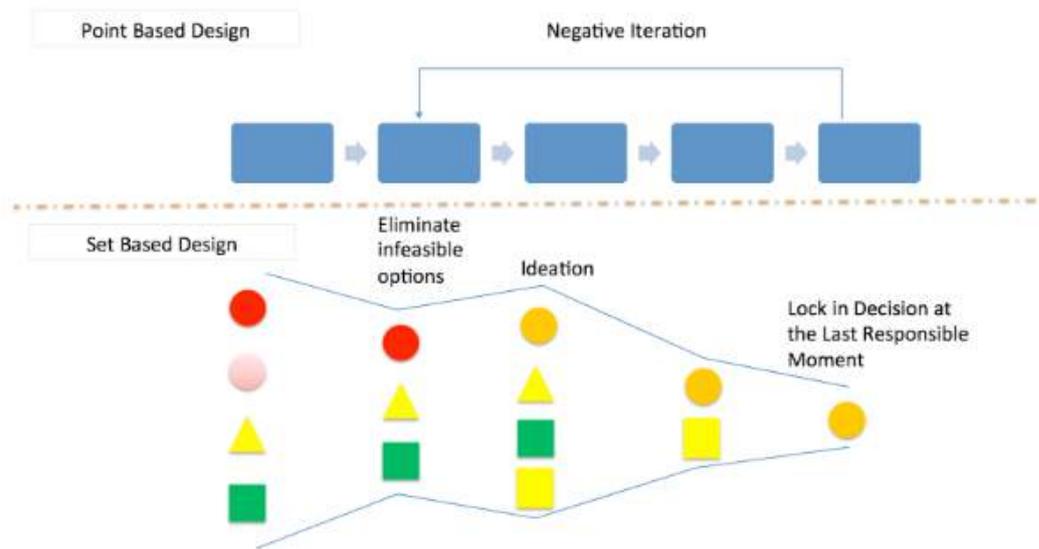


Figura 11: Comparación modelo de diseño basado en conjunto y modelo de diseño basado en punto

(Fuente: Lean Construction Blog (s/a). An introduction to Set-Based Design. Obtenido de <[https://leanconstructionblog.com/introduction-to-set-based-design.html#:~:text=Set%2Dbased%20Design%20\(SBD\),and%20construction%20\(AEC\)%20industry.&text=Known%20as%20point%2Dbased%20design,greater%20detail%20of%20the%20concept.](https://leanconstructionblog.com/introduction-to-set-based-design.html#:~:text=Set%2Dbased%20Design%20(SBD),and%20construction%20(AEC)%20industry.&text=Known%20as%20point%2Dbased%20design,greater%20detail%20of%20the%20concept.)>

La figura 11 muestra dos tipos de desarrollo del diseño. El primero, es el modelo tradicional, diseño basado en puntos, en el cual, solamente se maneja una opción y todo el equipo debe trabajar en base a ella, es un proceso lineal y que en caso de surgir alguna restricción puede aumentar el tiempo y por tanto los costos.

Por otro lado, el segundo modelo es el que se ha presentado, se trata de mantener un conjunto de opciones durante un mayor largo de tiempo y así obtener mayor información y conocimiento sobre el resultado final. Por ejemplo, según Doanh Do (s/a) muchos equipos de proyectos utilizan este sistema mediante el uso de muchas alternativas de diseño, entonces al momento de realizar la planificación con las herramientas del Last Planner System, se evalúan hitos importantes en los que los equipos deben considerar diversas opciones de diseño a la vez que conoce las necesidades de los usuarios finales.

Al trabajar con un conjunto amplio de alternativas se podrán eliminar aquellas que no resulten fiables, entonces se reduce la posibilidad de volver a comenzar desde el inicio (como ocurre

con el modelo basado en puntos, en el que se maneja una sola opción), esto se traduce en reducción de tiempo y reducción de costo.



CAPITULO 3: Integración entre BIM y Lean

En este capítulo se analiza el Paper del profesor Sacks llamado “The Interaction of Lean and Building Information Modelling in Construction” como un primer acercamiento a lo que se realizará en los casos de estudio. Aquí se analiza de qué forma en esta investigación se llevan a cabo estas sinergias y luego se analizan aquellos principios Lean que presentan mayor interacción con las funcionalidades de BIM y viceversa

3.1 Interacciones positivas y negativas entre las dos metodologías

Según el paper publicado por Sacks et all (2010) llamado “The Interaction of Lean and Building Information Modelling in Construction”, se han encontrado a través de una matriz que yuxtapone las funcionalidades de BIM con los principios de Lean Construction aproximadamente 56 coincidencias, de las cuales se analizarán aquellos principios Lean que presenten mayor interacción con las herramientas BIM y viceversa. La figura10 muestra las 3 interacciones para ambas metodologías que se explicarán durante este capítulo. Además, en los anexos se incluyen las matrices de interacción y la explicación de cada interacción.

En el caso del anexo 2 se muestran las funcionalidades BIM y 3 principios Lean que son los que mayores interacciones presentan con las funcionalidades. Los números que se encuentran en la celda hacen referencia a la explicación del por qué se ha considera como una interacción y que se encuentran en el anexo 1. Aquellos números que se encuentran entre paréntesis representan una interacción negativa.

Por otro lado, en el anexo 3 ocurre lo inverso a lo presentado en el párrafo anterior. En la columna se encuentran los principios Lean y en la fila, las funcionalidades BIM que más interacciones presentan con estos principios. Al igual que en el caso anterior, los números que se encuentran en las celdas hacen referencia a la explicación del por qué se ha considera como una interacción y que se encuentran en el anexo 1. También, aquellos números que se encuentran entre paréntesis representan una interacción negativa.



Figura 12: Principios y funcionalidades con mayor número de interacciones.

Fuente: Elaboración propia

Este mismo Paper menciona que la mejor forma de mejorar los proyectos de construcción es a través del enfoque del IPD (Integrated Project Delivery), el cual puede aplicarse sin la utilización de BIM pero que este es esencial para eficientemente lograr los objetivos de la integración requerida que exige el Integrated Project Delivery.

Algunos ejemplos que se citan sobre la interacción de estos dos enfoques son, por ejemplo, el de un intento por evaluar el impacto de CAVT (Computer Advanced Visualizations Tools) (Rischmoller et al, 2006) en el que se utilizaron algunos principios Lean durante la etapa de diseño de la construcción del proyecto. Esto tradujo resultados como una reducción del desperdicio, mejorar el flujo y un mejor valor del producto a través de una sinergia entre los principios de Lean y CAVT.

Otro caso, Khanzode et al (2006) intentó ligar los conceptos del VDC (Virtual Design Construction) con los de LPDS (Lean Project Delivery System), en este caso, los conceptos de

VDC se pueden representar como los de BIM debido a las similitudes que existen en entre estos dos en cuanto a principios y tecnologías. De acuerdo con este estudio, la aplicación de VDC en etapas claves del proyecto realzó el LPDS.

Por otro lado, Sacks et al (2009) concluyó que la contribución de BIM en la visualización del producto y del proceso de construcción de los proyectos según los principios de Lean ayudan a crear un mecanismo que mejora el flujo reduciendo la variabilidad durante el proceso de construcción.

Khemlani (2009) analizó un caso de estudio en un proyecto de construcción en el que se estaba utilizando el enfoque del IPD, el cual era una construcción de un hospital de 320 millones de dólares que se realizaba según una experiencia anterior en la que se implementó BIM y Lean como el Camino Medical Center (Eastman et al, 2008, p.358). En cada uno de estos proyectos, se utilizó el sistema BIM de su elección durante el diseño de detalle. Luego, se utilizaron software de colaboración para la coordinación y el diseño fue probado utilizando un software llamado Solibri model checker. Además, se utilizaron herramientas Lean tal como el Value Stream Mapping para monitorear y mejorar los procesos del proyecto. El resultado final fue una demostración que el uso adecuado de Lean y BIM mejora y obtiene un máximo beneficio del proceso de gestión de proyectos.

Eastman et al (2008) comenta que las técnicas del Lean Construction requieren una coordinación cuidadosa entre el contratista general y los subcontratistas para asegurar que los trabajos se realicen justo en el momento en el que los recursos se encuentran disponibles en campo. Debido a que BIM provee un preciso modelo del diseño y de los recursos materiales requeridos para cada etapa del trabajo, este provee la base para mejorar la planificación y el cronograma de los subcontratistas y ayuda a asegurar la metodología del Just In Time tanto de materiales, personas y equipos.

3.1.1 Principios Lean con mayores interacciones con funcionalidades BIM

Haciendo referencia a la figura 12, durante el estudio de parte de Sacks et al (2010) se encontró que son tres los principios de Lean que poseen más interacciones con las funcionalidades de BIM y se muestran a continuación (Ver anexo 1 y 2):

- A) Reducción de desperdicios a través de un mejor diseño del producto, reduciendo su variabilidad, es decir, reduciendo la necesidad de cambios en etapas posteriores al diseño.

Este principio presenta interacción con algunas de las funcionalidades BIM tales como visualización de forma, rápida generación de alternativas, análisis predictivo del rendimiento, evaluación de conformidad con el valor del cliente, representación única de información, detección de incongruencias, generación automática de documentos y dibujos, visualización multiusuario de modelos multidisciplinarios, generación automática de las tareas de construcción, visualización 4D de los cronogramas de construcción, información en línea de productos y procesos, fabricación controlada por computadora.

Es muy común encontrar la frase “el cliente define el valor”, la cual es una de las mayores sinergias entre las metodologías estudiadas. Como se explicó en la sección 2.2.1, uno de los principios básicos es justamente definir el valor del producto, para ellos es necesaria una eficiente captura de los requerimientos del cliente. Es en esta etapa del proyecto donde los conceptos de Lean y BIM toman real significancia dado que generar valor implica entender los propósitos del cliente y ayudarlo a que se cumplan con los mínimos recursos de tiempo y dinero; esta colaboración entre las dos metodologías permite que la industria se concentre con mayor detenimiento en los ciclos de vida del proyecto (Koskela et al 2013).

Por otro lado, no debería ser un impedimento tomar especial atención a esta etapa del proyecto ya que según Koskela et al (2013) la relación de costos entre la construcción y el diseño se encuentran en relación de 1 a menos de 0.1, mientras que el costo relacionado a salarios se encuentra alrededor del 40 al 200, a partir de esto, crear valor debería ser más importante que el intentar reducir los costos durante el diseño, siempre y cuando se utilicen métodos confiables y consistentes.

Ahora, el desafío con el que deben trabajar los encargados de elaborar el proyecto es cómo vincular adecuadamente al cliente en el proyecto, maximizando los ingresos y gestionando la entrega de beneficios a los diferentes grupos de “*stakeholders*” o partes interesadas del proyecto. (Winter et al.2006).

Aún en el diseño, al integrar estas dos metodologías se puede desarrollar una rápida evaluación de alternativas, así como un análisis predictivo del rendimiento. El primero se debe a que es durante este momento en que el cliente decide porqué quiere construir un edificio, el contratista debe entender qué es lo que se debe construir y cómo conseguir este propósito. Debido a que el proyecto empieza a ganar forma, es necesario integrar diferentes puntos de vista para lograr que los proyectos brinden los beneficios esperados. En el caso del segundo, se debe realizar un test de prueba para asegurar que el diseño cumpla con los requisitos especificados por el cliente. Estos dos ayudan a reducir los desperdicios, mejoran la performance del producto final y brindan la posibilidad de encontrar diferentes alternativas y mejores opciones para la construcción.

También, a lo largo de la tesis se ha comentado mucho sobre el “*clash detection*” y la ventaja que brinda al poder integrar diferentes modelos de distintas disciplinas, fusionarlos y que a partir de esto, se puedan identificar conflictos que se pueden resolver antes de la construcción y que brindan la posibilidad de reducir errores al momento de ejecutarse, esta debe ser llevada

a cabo por grupos multidisciplinarios para que su experiencia y conocimiento en su campo permitan identificar los problemas en el diseño. Otra de las interacciones positivas es la de que existe una única fuente de información, esto se refiere a que ya no se necesita que los diferentes dibujos y especificaciones se elaboren en diferentes lugares y que los operadores estén pendientes de mantener consistencia entre las diferentes representaciones, sino que a partir de ahora existe una única fuente de información en la que todos los informes que incluyen dibujos y documentos se derivan automáticamente.

Ya en la etapa de construcción, otra de las sinergias mencionadas es la de una generación automática en las tareas de construcción, en esta, al momento del planeamiento, esta funcionalidad de BIM permite que se omitan errores humanos tales como omisiones de tareas o de etapas de trabajo. También, la posibilidad de la visualización 4D de los cronogramas permite que los interesados en el proyecto puedan transmitir y comprender el cronograma mucho más fácil que en un diagrama Gantt tradicional, además, influye en el tiempo y costo debido a que mejora la comunicación y optimiza las entregas del Just In Time de materiales y equipos, a través de pruebas dinámicas de choques de los objetos temporales, permanentes, zonas de trabajo y otros objetos en el sitio. (Andreassen, 2015)

Finalmente, las últimas dos sinergias encontradas de esta herramienta Lean con las funcionalidades BIM son las de información en línea de productos y procesos, y fabricación controlada por computadora. En el primero, cuando la información actualizada del producto se encuentra disponible en línea, existe la posibilidad de corregir e identificar errores que pueden ser levantados en corto tiempo, reduciendo su impacto. En el caso del segundo, se pueden reducir las posibilidades de error humano al momento de la transcripción de información mediante una transferencia directa de datos o instrucciones de fabricación a una maquinaria controlada numéricamente (CNC, por sus siglas en inglés). (Garber, R .2014).

B) Mejorando el flujo y reduciendo la incertidumbre en la producción.

Para este segundo principio se detectaron las siguientes sinergias, en cuanto a un análisis predictivo del rendimiento, estimaciones automáticas de los costos, evaluación de conformidad con el valor del cliente, representación única de información, detección de incongruencias, simulación de los procesos de construcción, visualización 4D de los cronogramas de construcción, integración con los subcontratistas y provisión de un contexto de recopilación de estado de datos en el sitio o fuera del sitio.

Así como se ha mencionado a lo largo de la tesis, el realizar una correcta apreciación del diseño en etapas tempranas para evaluar si se están cumpliendo los requisitos del proyecto tales como una evaluación de los requisitos de energía, acústicos, térmicos, mecánicos, etc reducen la variabilidad del producto final y reducen la incertidumbre. Se puede observar que una misma funcionalidad BIM puede optimizar varios de los principios Lean.

Un principio que aún no se había tocado previamente en este capítulo es de las estimaciones automáticas de los costos, en este caso, BIM permite que se vinculen salidas automáticas de cantidades ligadas a los costos y que son más precisas al reducir el riesgo de error humano. También, cualquier modificación que se realice y que implique un cambio en el diseño con su consecuente afecto en los costos también se realizará automáticamente mejorando el flujo y reduciendo la variabilidad.

También, una representación única de información así como la detección de incongruencias que ya se explicaron en el principio Lean anterior repercuten directamente en mejorar el flujo y en reducir la incertidumbre al agilizar los procesos convencionales y al detectar incongruencias en etapas tempranas.

Ya en la etapa de construcción, la simulación de los procesos de construcción se puede utilizar para probar y mejorar los procesos constructivos, así como aplicar de manera virtual el first run

studies (es una metodología Lean que implica simular un trabajo a realizar a futuro a menor escala con la finalidad de mejorar los procesos, observar el desempeño, correctamente aplicada puede mejorar la producción, costos, tiempo, calidad seguridad, etc) que es casi impráctico o imposible aplicarlo durante la construcción. (Carbajal G & Bermudez D. 2017). Otra interacción es con la visualización 4D del cronograma de la construcción que mejora el flujo de trabajo a partir de poder observar los procesos de construcción para identificar conflictos de recursos en el tiempo y espacio y poder resolver problemas que se puedan presentar; esto puede ayudar a identificar cuellos de botella.

Finalmente, son dos interacciones más que se encuentran relacionadas a la comunicación en línea. La primera de ellas es contar con una base de datos que permita la integración de los contratistas, esta funcionalidad de BIM ha sido muy desarrollada a lo largo de la tesis pero para la etapa del diseño, en la que se proponía un trabajo multidisciplinario entre actores principales y secundarios del proyecto. En este caso, se busca eliminar los tiempos de espera en obra a partir de esta base de datos que pueda permitir que las entregas de materiales, equipos o mano de obra se realicen en el momento adecuado, lo cual influiría en acelerar el flujo del proyecto. Finalmente, la última funcionalidad de BIM es la de una provisión de un contexto de recopilación de estado de datos en el sitio o fuera del sitio. En este caso, la principal ventaja de BIM es que se puede contar con una base de datos que pueda rápidamente dar respuesta a reportes sobre determinados RFIs y a problemas relacionados con los flujos de trabajo.

C) Reducción de las duraciones en los ciclos de producción.

Al ser este un principio de Lean muy influenciado presenta interacción con casi todas las funcionalidades de BIM que repercuten directamente en la producción. Por ejemplo, durante el diseño, una rápida generación de múltiples alternativas de diseño así como un análisis predictivo del rendimiento ayuda a reducir los desperdicios en etapas posteriores, mejoran el

performance del producto final y brindan la posibilidad de encontrar diferentes alternativas y mejores opciones para la construcción. Otras funcionalidades de BIM que interactúan con este principio es la del clash checking automático puesto que al encontrar incongruencias se están reduciendo los re procesos y acortando los ciclos de producción. También, la generación automática de dibujos y documentos aceleran los trabajos que con un sistema convencional demandarían mayor tiempo al tener que dibujar los planos en CAD 2D y que sean coherentes entre ellos y reunir toda la información necesaria de campo para elaborar reportes y documentos.

Otras funcionalidades BIM que repercuten es la posibilidad de edición multiusuario de un modelo de una sola disciplina, esto acelera los tiempos de producción ya que se pueden realizar cambios rápidos de los diversos requerimientos del proyecto, así como la posibilidad de un análisis de estimaciones de costos colaborativo que influyen en el diseño y construcción. Siguiendo en ese sentido, la visualización multiusuario también permite un procesamiento paralelo y coordinado de las diferentes áreas de trabajo que en un sistema tradicional, demandaría más tiempo con los trabajos de CAD.

La rápida generación y evaluación de alternativas de planes de construcción se puede lograr a través de una automática generación de las tareas de construcción, la simulación de un proceso de construcción y de una visualización de los cronogramas en formato 4D; todas estas, explicadas anteriormente, repercuten directamente en la reducción de los ciclos durante la construcción ya que dan como resultado programas operativos optimizados, con menos conflictos.

Finalmente, la visualización del estado de los procesos y la comunicación en línea sobre el producto y la información de los procesos permite reducir los ciclos de cada actividad a partir de obtener el modelado BIM y poder observar los procesos constructivos permitirá que

actividades que se realizan una después de otra en un mismo lugar de construcción puedan ser mejoradas y realizadas con menor tiempo. Así mismo, la maquinaria dirigida controlada por computadora alimentada directamente desde un modelo puede ayudar a acortar los tiempos de ciclo al eliminar la entrada de datos intensiva en mano de obra y/o la producción manual, lo que acorta el tiempo de ciclo para cualquier espacio o conjunto dado. Por último, la integración de una base de datos con los subcontratistas permite que se eliminen pasos de procesamiento de datos en los cuales se ordenan o renuevan entregas de material que es un tiempo perdido, por lo tanto, esto también mejora los tiempos de cada ciclo.

3.2.2 Funcionalidades BIM con mayores interacciones con principios Lean

En el mismo sentido, haciendo referencia a la figura 12, durante el mismo estudio de Sacks et al (2010), las funcionalidades de BIM que poseen más interacciones con los principios Lean son las siguientes (ver anexo 1 y 3):

1) Evaluación estética y funcional

Esta funcionalidad de BIM ya se explicó que interacciona directamente con un principio Lean que es el de la reducción de la variabilidad, sin embargo, no es el único principio, también con el principio de simplificación que influye en el diseño del sistema de producción de flujo y valor, además se relaciona con el proceso de generación de valor (garantizar la captura integral de requisitos, soportar el flujo de requisitos, verificar y validar) y se encontró una interacción más con la resolución de problemas de Lean (ve a ver por ti mismo y el decidir por consenso, considerar todas las opciones).

En cuanto al principio de simplificación, BIM simplifica la tarea de comprender el diseño y esto ayuda a los planificadores a lidiar con productos complejos ya que cada vez los sistemas de construcción son más complejos que incluso los profesionales con experiencia y capacitados tienen dificultades a la hora de generar modelos mentales precisos solo con dibujos.

En cuanto a la segunda interacción, es decir al proceso de generación de valor (que incluye los principios citados previamente), debido a que todos los aspectos del diseño se capturan en un modelo 3D que el cliente puede comprender fácilmente, es posible capturar todos los requisitos y estos se pueden comunicar de manera clara durante la etapa de desarrollo del concepto. Además, se puede incluir a más partes interesadas con la finalidad de que participen en la elaboración del diseño. También, la creación virtual de prototipos permite la verificación automática de las normas de diseño y construcción, esto hace que la verificación y validación del diseño sea más eficiente. Por último, se soporta el flujo de requisitos a través de una única representación de información en la que se integran las múltiples representaciones y dibujos que se realizaban anteriormente en 2D.

Finalmente, se interaccionan los principios de Lean orientados a la resolución de problemas. Por ejemplo, el típico “Go and see for yourself” se mejora ya que BIM permite que se pueda visualizar virtualmente el proyecto y el lugar de trabajo observando posibles problemas, además, con los objetos que cuentan inteligencia e información paramétrica, la resolución de problemas también es más eficiente. Luego, al contar con muchas partes interesadas en la etapa de diseño, es posible que el cliente o el constructor puedan escuchar diferentes opiniones sobre cómo realizar los trabajos y pueda considerar todas las opciones y decidir por consenso.

2) Visualización multidisciplinar de modelos fusionados o separados

Esta funcionalidad de BIM se comentó previamente que se relaciona con la reducción de variabilidad y con la reducción de los ciclos de producción pero también se relaciona con el uso de equipos multidisciplinarios, con el proceso de generación de valor (garantice la captura integral de requisitos, garantice el flujo de requisitos, verifique y valide) y con la resolución de problemas de Lean (decidir por consenso, considerar todas las opciones).

En el caso de la conformación de equipos multidisciplinarios que incrementan la flexibilidad, BIM mejora este principio de Lean a través de la coordinación de diseño entre múltiples modelos de diseño utilizando un visor de modelos integrado que permite a los equipos que aporten conocimientos y habilidades multidisciplinarias paralelamente.

En cuanto al proceso de generación de valor, la participación por parte de los clientes en revisiones simultáneas de diferentes alternativas de diseño impulsa que se puedan identificar conflictos entre los requisitos, además, el poder compartir modelos entre todos los participantes de un equipo del proyecto ayuda a una mejor comunicación en la fase de diseño y esto garantiza un mejor flujo de los requisitos, que se entiendan y se transmitan a todo el equipo, constructores y proveedores. Por último, el “*clash cheking*” y la resolución de otros problemas de integración ayudan a verificar y validar la información del producto.

Finalmente, en cuanto a la resolución de conflictos, la visualización multidisciplinar de los modelos apoya y facilita la toma de decisiones ya que proporciona más y mejor información a todos los involucrados al expandir la cantidad de opciones a considerar

3) Visualización 4D de cronogramas de construcción

Para este punto, también se encuentran interacciones con los 3 principios de Lean ya presentados, además de estos, se puede mencionar otros principios como el de la estandarización, el de utilizar la gestión visual (visualización de métodos de producción y de procesos de producción), también al de la utilización de procesos paralelos (tiene que ver con diseñar el sistema de producción para flujo y valor), con el principio de verificar y validar y finalmente, con la resolución de problemas de Lean (decidir por consenso, considerar todas las opciones).

En cuanto a que esta funcionalidad impulsa la estandarización, esto se debe a que BIM permite que se puedan producir animaciones sobre producción o secuencias de instalación que guían a

los trabajadores sobre cómo realizar el trabajo bajo ciertos contextos específicos y son un buen medio para que cuando existan rotaciones de trabajadores ya se sigan procedimientos estandarizados.

Las herramientas 4D de BIM brindan la posibilidad de una visualización ideal para el proyecto durante la etapa de diseño y construcción, el modelado y animación de secuencias de construcción brindan la oportunidad de visualizar los procesos constructivos para así poder identificar problemas de seguridad, conflictos de recursos en el tiempo y espacio y que se puedan resolver. Además, este es un proceso paralelo, puesto que se puede visualizar etapas posteriores aun cuando se estén ejecutando procesos previos, esto no sería posible sin estas herramientas de BIM, por lo que también se podrían identificar cuellos de botella y mejorar el flujo.

Por otro lado, la visualización de los horarios propuestos y la visualización de los procesos en curso verifica y valida la información del proceso. Finalmente, así como en los principios anteriores, estas herramientas de BIM pueden apoyar a la toma de decisiones colaborativa.

Es importante mencionar que en este principio también se encontró una interacción negativa que tiene que ver con el principio Lean de la reducción de inventario. Esto se debe a que BIM puede aumentar el inventario de alternativas de diseño si es que no se maneja un adecuado sistema que agilice el flujo de información, por lo que no siempre es conveniente contar con una amplia cantidad de opciones.

Además, entre los principios Lean, que en las interacciones mostradas por Sacks et al (2010) presentan menos utilidades o interacciones negativas se encuentra:

- Reducir inventario
- Sistema de producción simplificado
- Uso de solo tecnología confiable

Esto se debe a que BIM puede aumentar el inventario de información si es que no se aplica un sistema que agilice el flujo de información. Además, es necesario que los software y los usuarios que apliquen BIM sean competentes puesto que las herramientas BIM son sofisticadas y esto puede generar que el proceso sea inestable e ineficiente o también que el modelado no se haya realizado adecuadamente y se esté confiando en un trabajo que en el futuro creará problemas. (Sacks et al 2010)

Por otro lado, según Koskela et al (2013) es importante reconocer que en los siguientes casos no se puede afirmar que se está implementando correctamente el sistema Lean/BIM. Por ejemplo, aquellos proyectos en los cuales no exista una participación de las partes interesadas en etapas relevantes del proyecto, el uso de BIM solo para una disciplina (arquitectura, estructura, etc) o para el diseño y detectar incongruencias y no durante el planeamiento y control de la producción. Tampoco en los casos en que solo se utilice Lean Construction para una sola fase del proyecto (diseño o construcción) o cuando no se compartan los modelos durante toda la cadena de suministro.

CAPITULO 4.0 Casos aplicativos estudiados:

En este capítulo se analizarán tres proyectos de construcción reales ejecutados en la ciudad de Lima que por temas de confidencialidad serán llamados Proyecto A, Proyecto B y Proyecto C. El primero de ellos es un proyecto en el que solamente se aplicó Lean Construction, se analizarán sus resultados, de qué forma se aplicó esta filosofía y cómo se pudo haber implementado BIM. En los siguientes dos proyectos se incluye la metodología de BIM, en uno de ellos para la etapa de diseño y en el otro, en la etapa de construcción. A partir de estos dos proyectos, se buscarán las interacciones entre BIM y Lean Construction, de forma similar a la investigación realizada por el profesor Sacks pero ya para proyectos ejecutados en Lima. Además, se analiza de qué forma se aplicaron y qué otras funcionalidades se pudieron aplicar.

4.1 Casos a analizar

Como se mencionó previamente, se analizarán tres diferentes proyectos de construcción que han sido ejecutados para edificios multifamiliares, el desglose de esta unidad se muestra en la tabla 2.

Tabla 2: Resumen de los proyectos analizados en este capítulo

Proyecto	Análisis	Puntos que se analizan
Proyecto A	Ejecutado solamente con la metodología Lean Construction	5.2.1 Información del proyecto 5.2.2 Análisis de los RDIS 5.2.3 Aplicación de Lean Construction 5.2.4 Cómo se pudo implementar la metodología de BIM
Proyecto B	Ejecutado con Lean Construction y se incluye BIM en la etapa de construcción	5.2.1 Información del proyecto 5.2.2 Análisis de los RDIS 5.3.3 Interacción de la aplicación BIM y herramientas de Lean Construction aplicadas en la etapa de construcción 5.3.4 Funcionalidades de BIM que se pudieron haber utilizado en la etapa de construcción

Proyecto C	Ejecutado con Lean Construction y se incluye BIM en la etapa de diseño	5.2.1 Información del proyecto 5.2.2 Análisis de los RDIS 5.3.3 Interacción de la aplicación BIM y herramientas de Lean Construction aplicadas en la etapa de diseño 5.3.4 Funcionalidades de BIM que se pudieron haber utilizado en la etapa de construcción
-------------------	--	--

Fuente: Elaboración propia

Como se muestra en la tabla 2, el Proyecto A se llevó a cabo solamente con las herramientas que brinda Lean Construction mientras que en los otros dos se incorporó la metodología de BIM, uno de ellos en la etapa de construcción Proyecto B y el otro en la etapa de diseño Proyecto C.

El proyecto A es el que no cuenta con la influencia de BIM y se aplicaron las herramientas de Lean Construction. Se desarrolló en el distrito de Santiago de Surco y es un proyecto multifamiliar de un edificio que cuenta con 10 pisos, una azotea y 3 sótanos. Se empieza con la información general sobre el proyecto, continúa con un análisis e influencia de los RDI's que incluye costos de adicionales, luego con el uso de Lean en el proyecto y finalmente, con un análisis del autor de la tesis sobre las herramientas BIM que se pudieron aplicar.

Por otro lado, se analiza el proyecto B ejecutado con BIM y Lean durante la etapa de construcción, el cual fue ejecutado en el distrito de San Isidro. Este también es un edificio multifamiliar de 8 pisos, una azotea, un semisótano y 3 sótanos. También, se empieza con la información general sobre el proyecto, continúa con un análisis e influencia de los RDI's que incluye costos de adicionales, luego con el uso de BIM y Lean en la etapa de construcción y finalmente un análisis del autor de la tesis sobre qué herramientas BIM se pudieron aplicar a lo ya realizado.

Finalmente, el Proyecto C es un edificio de 20 pisos y 2 sótanos en el que se aplicó la metodología de BIM durante la etapa de diseño. En este proyecto se inicia con una información general, luego un análisis de los RDIs más profundo puesto que se desarrolló al terminar el proyecto y busca reconocer causas de los requerimientos de información y qué tan influyente fue el uso del modelado y metodología BIM para mejorar en futuros proyectos. Finalmente, continúa con la aplicación de BIM en la etapa de diseño y termina con análisis personal de qué más se pudo añadir durante la etapa de diseño.

4.2 Proyecto A:

4.2.1 Información sobre el proyecto:

Como se mencionó previamente, este proyecto utilizó solamente las herramientas del Lean Construction, específicamente las del Last Planner System (Sistema del último planificador).

En la tabla 3, se muestran los costos para esta obra, también, se obtuvo una métrica en porcentaje como la cantidad de RFIs entre los m2 construidos. El valor de la métrica es de 2.67%, un valor que resulta mayor a comparación de los otros dos proyectos analizados, se realiza una comparación con el proyecto B en la tabla 8 del numeral 5.3.2.

Tabla 3: Datos a analizar del Proyecto A

Costos	Proyecto A
Costo de obra contractual	S/. 18,307,693.57
Costo por adicionales	S/. 245,388.24
M2 construidos	12,864.09
RFI	342
RFI/m2 (%)	2.67

Fuente: Elaboración propia

Además, la empresa encargada de llevar a cabo el proyecto fue penalizada con un deductivo de S/1,000,000 por extensión de plazo, lo cual se muestra en la tabla 4. Las causas que provocaron esta penalidad no son responsabilidad de Lean sino de factores externos que se explicarán más adelante y que los responsables del control de la obra y del uso del Last Planner System no lo hicieron de manera correcta provocando las falencias en el control del planeamiento que se explicarán en los siguientes párrafos.

También, se observa que el costo por m² de los adicionales es de S/. 19.08 y el porcentaje (%) de los adicionales sobre el presupuesto contractual es de un 1.34%. De los 3 proyectos analizados, el porcentaje más alto del precio por m² de los adicionales corresponde a este proyecto y curiosamente, es el que mayor cantidad de RDIs presenta.

Tabla 4: Penalidades del Proyecto A

Análisis de penalidad	Proyecto A
Costo de obra contractual sin penalidades	S/. 18,307,693.57
Penalidades	S/. 1,000,000.00

Fuente: Elaboración propia

De la tabla anterior, se puede apreciar que la penalidad por costo contractual es de 5.46%, lo cual es considerable. La utilidad en nuestro medio es de alrededor del 10% sobre el costo directo total de la obra (CAPECO, 2003). En los últimos años, la competencia de las empresas constructoras ha aumentado por lo que la tendencia sería que la utilidad se haya reducido aún más, teniéndose en la actualidad utilidades en construcción de edificaciones inmobiliarias de entre el 6% y 8%.

Entre las razones del retraso que provocó la penalidad mencionada se encuentran los siguientes. Una posible razón es que el plazo contractual de 366 días sea insuficiente para la forma de trabajar de la empresa constructora y que no le haya permitido terminar en el tiempo debido, lo cual luego generó que los trabajos se realicen de manera más apurada y con menos calidad.

También, hubo paralizaciones de obra que son netamente responsabilidad de la constructora, que se debían a problemas de seguridad en obra y con los tiempos de los horarios de trabajo. Existieron también algunas circunstancias que provocaron los retrasos como demoras en los trabajos ejecutados por los subcontratistas, como la falla de equipos indispensables como la excavadora, bomba para vaciado, así como procesos mal ejecutados por la mano de obra.

Por otro lado, se tuvo una gran cantidad de RFI, un total de 342 y el tiempo de respuesta obtenido para ellos fue de 35 días. Lo que ocurrió en este proyecto fue que en algunos casos, los requerimientos de información se realizaban justo cuando se iban a ejecutar las partidas, ya que no fueron detectados antes, por ende, en algunos casos, se tomaban decisiones en campo para agilizar los trabajos pero en otros era necesaria una respuesta inmediata de los ingenieros estructurales para poder ejecutar los trabajos, era esta respuesta la que en muchos casos demoraba y si se tomaba en campo una decisión errónea, esto generaba retrabajos. Al alargarse la respuesta de los RFI, se alargaron partidas que se encontraban dentro de la ruta crítica de la obra y que al no ser resueltas a tiempo influyeron directamente en el retraso del proyecto. Esto demuestra que la aplicación del sistema del último planificador no se realizó correctamente ya que el plan semanal no está correctamente protegido de la variabilidad y no se garantizaba el flujo continuo de la cadena de producción.

Por otro lado, también se evidencia que no se realizó un trabajo adecuado en la etapa de diseño, los RFIs no se detectaron a tiempo y esto se debe a que el proyecto se trabajó bajo el modelo de licitación tradicional, en la que la comunicación entre los participantes es escasa durante el diseño y lleva a tener pobres diseños, planos que no se encuentran compatibilizados entre especialidades y que provocan, ya en la etapa de construcción, al ser detectados tardíamente, tiempos no productivos o no contributorios. (Taboada et al, 2011)

4.2.2 Impacto en el proyecto de los RFI:

En la tabla 5 se puede observar que este proyecto tuvo 342 RFI, donde el 75% de ellos correspondía a la especialidad de Arquitectura, mientras que el segundo lugar lo ocupa la especialidad de estructuras con un 12%. Además, en la figura 13 también se muestra el porcentaje de RFIs por área.

Como ya se verá al analizar los siguientes casos, la partida de arquitectura y estructuras son las que generan un mayor número de RFI, por lo tanto, son estas áreas a las que mayor esfuerzo en encontrar estas incongruencias debe darse. Esto también es un indicador que el diseño no ha capturado adecuadamente los requerimientos del cliente, es decir el valor que se busca entregar al cliente no ha sido desarrollado a través del diseño, en particular en Arquitectura y Estructuras. Esto también es un indicativo de que lo que no se realizó en el diseño repercute directamente en la fase de construcción.

Tabla 5: Cantidad y porcentajes de RFIs por áreas para el Proyecto A

Áreas	Cantidad de RFIs	Porcentajes (%)
Arquitectura	257	75
Estructuras	42	12
IIEE	30	9
IISS	12	4
Instalaciones mecánicas	1	0
Total	342	

Fuente: Elaboración propia

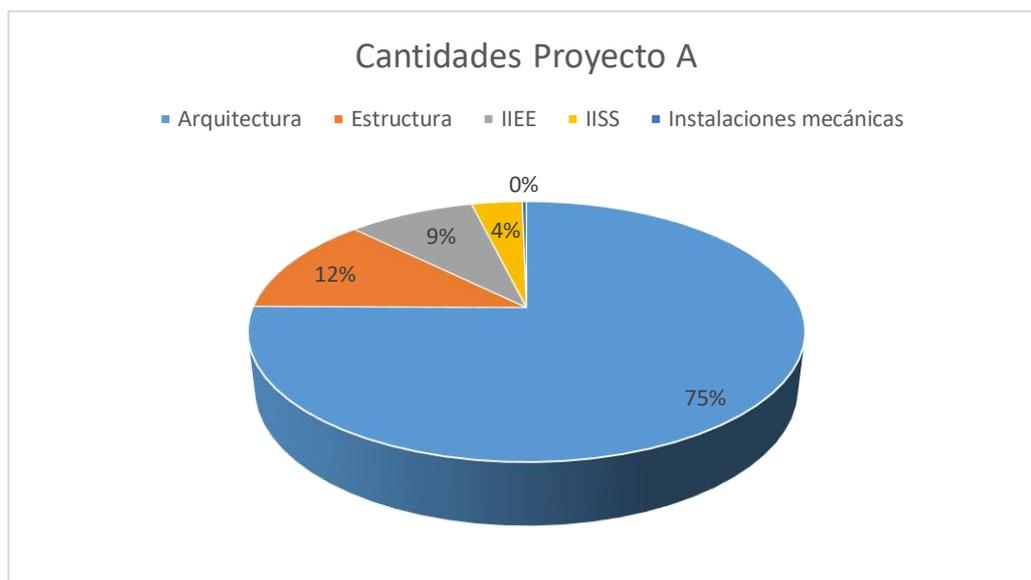


Figura 13: Porcentaje de RFIs por áreas para el Proyecto A

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, en la tabla 6 y en la figura 14 se muestran el impacto económico de los RFIs sobre el proyecto, producto de adicionales y deductivos, que representaron un incremento por un cuarto de millón de nuevos soles.

Tabla 6: Adicionales y deductivos para el Proyecto A

Análisis de adicionales	Adicionales (S/.)	Deductivos (S/.)
Arquitectura	234,660.84	-279,569.65
IIEE	120,857.95	-17,483.22
IISS	119,308.39	-4,419.27
Estructura	69,947.19	0.00
Instalaciones mecánicas	2,086.02	0.00
Totales	546,860.39	-301,472.14
Adicional final	245,388.25	

Fuente: Elaboración propia

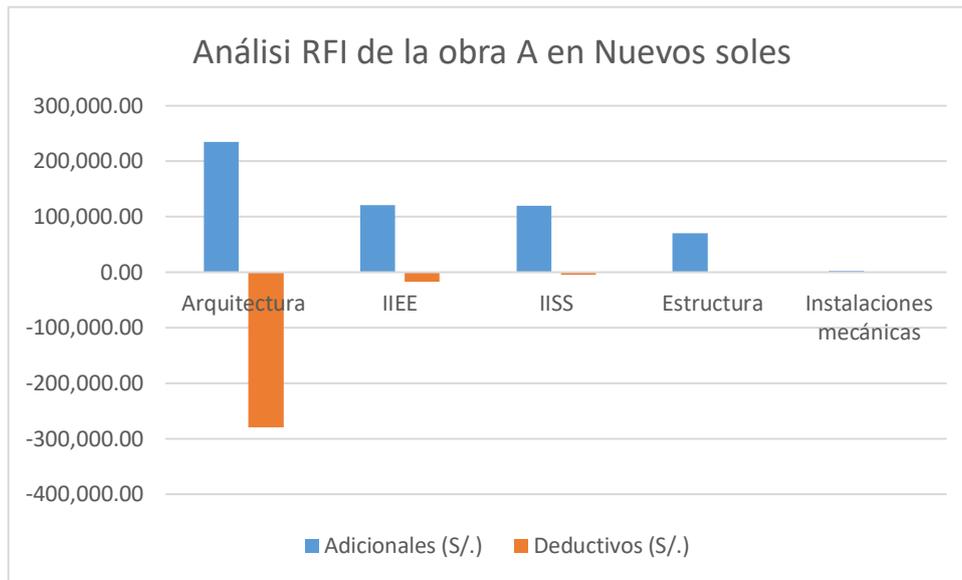


Figura 14: Precios de adicionales y deductivos para el Proyecto A.

Fuente: Elaboración propia

En este caso, se observa que los adicionales alcanzan un valor de más de medio millón de soles mientras que los deductivos llegan a un valor de más de un tercio de millón de soles. Estos valores, bastante altos, muestran una serie de deficiencias que existieron al momento de desarrollar el expediente técnico en la etapa de diseño.

En un proyecto de construcción, lo primero que se obtiene es el plano de arquitectura, a partir del cual se elaboran las siguientes especialidades y es justo esta la que mayores adicionales presenta, esto ocurre cuando no se emplea el “Lean Project Delivery System” (LPDS) ya que no hay una correcta interacción entre los participantes del proyecto, llámese diseñadores y también por parte de la constructora. La práctica errónea, pero habitual es que estos involucrados trabajen de manera fragmentada y por silos teniéndose una pobre comunicación entre los involucrados. Entre las causas de la gran cantidad de adicionales y deductivos encontrados por la contratista es que no hubo una buena interacción y comunicación entre las diferentes especialidades durante la etapa de diseño, así como la falta de herramientas aplicadas durante el diseño enfocadas en detectar errores.

4.2.3 Aplicación de Lean Construction

En cuanto a la aplicación de la metodología Lean en esta obra, se utilizaron las herramientas del Last Planner System en la planificación para el control del cumplimiento de las actividades y el uso correcto de los recursos. En ese sentido, se aplicaron planificaciones diarias, semanales (que se verificaban con un porcentaje de partidas cumplidas) y el empleo del look ahead basados en la programación maestra. A partir de los resultados, la aplicación de las herramientas del último planificador no se ejecutó de la manera correcta. En la programación semanal se debió haber realizado un correcto análisis de restricciones que haya permitido un mejor control del planeamiento y un flujo adecuado del proyecto, al no haber realizado esto de manera correcta, se genera el retraso en el proyecto con su consecuente penalidad. Como opinión personal, un valor adecuado para el PPC (porcentaje del plan cumplido) debe ser mayor al (75-80) %, sin embargo, no se lograron estos valores y por ende, el retraso en el proyecto. Para este proyecto, el rango del PPC se encuentra alrededor del 61%.

Durante el proyecto, se buscó que exista estandarización en los procesos, lo cual es uno de los principios de Lean, además, se realizaron capacitaciones que demuestran una intención de mejora continua. Los deductivos muestran que hubo una intención de reducir los costos por ambas partes ya que estas partidas eliminadas fueron detectadas a partir de que no eran necesarias dentro del objetivo final.

También, se realizó la sectorización de los pisos típicos a partir de la homogeneidad de los metrados y un tren de actividades para cada hito de la obra, el cual estaba delimitado según el rendimiento generado por cada cuadrilla y por la cantidad de metrado.

Se incluyeron el uso de los buffers, en este caso, se utilizó el día sábado como un día de trabajo y en el que se realiza metrado pero no estaba considerado dentro del cronograma principal.

La figura 15 resume las herramientas y principios Lean que se aplicaron en la obra y se explicaron en los párrafos anteriores. En el caso de las herramientas del Last Planner System,

estas no se aplicaron correctamente, tampoco se hizo un adecuado análisis de restricciones por lo que son aspectos en los que se deben trabajar y mejorar.

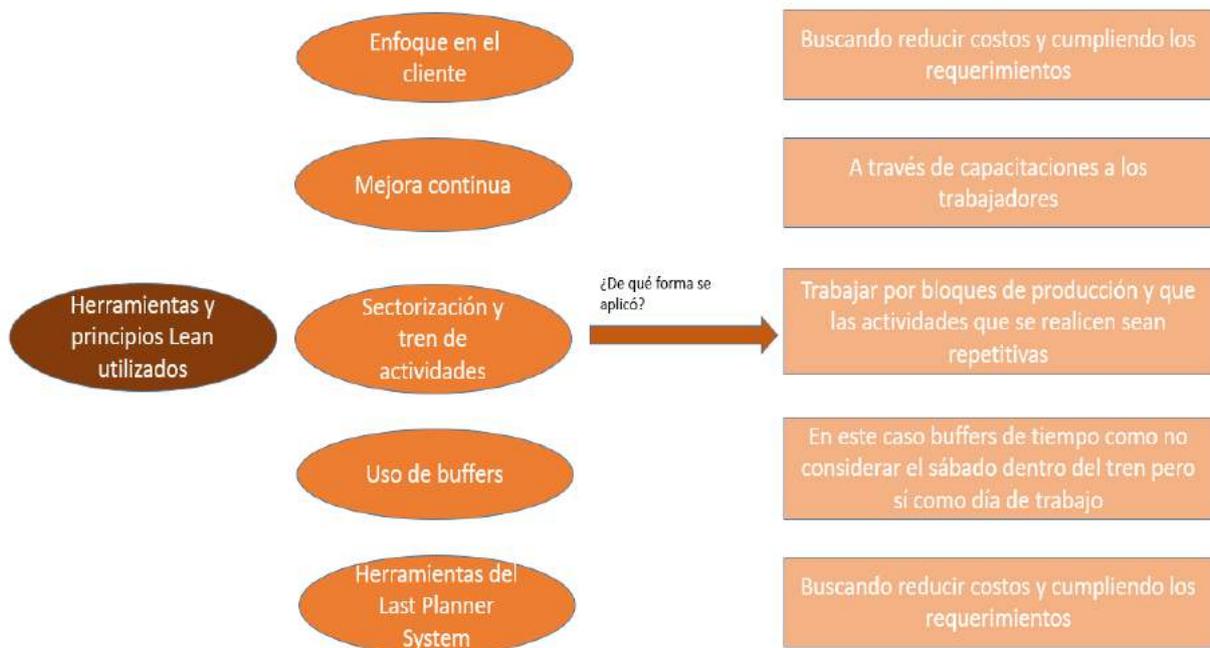


Figura 15: Herramientas y principios Lean utilizados

Fuente: Elaboración propia

4.2.4 ¿Cómo se pudo implementar la metodología de BIM?

Al no utilizar la metodología BIM se perdió la posibilidad de aplicar diferentes herramientas y por ende, el efecto positivo de las interacciones presentadas en el capítulo 3, la figura 16 siguiente muestra las interacciones que se pudieron haber utilizado:

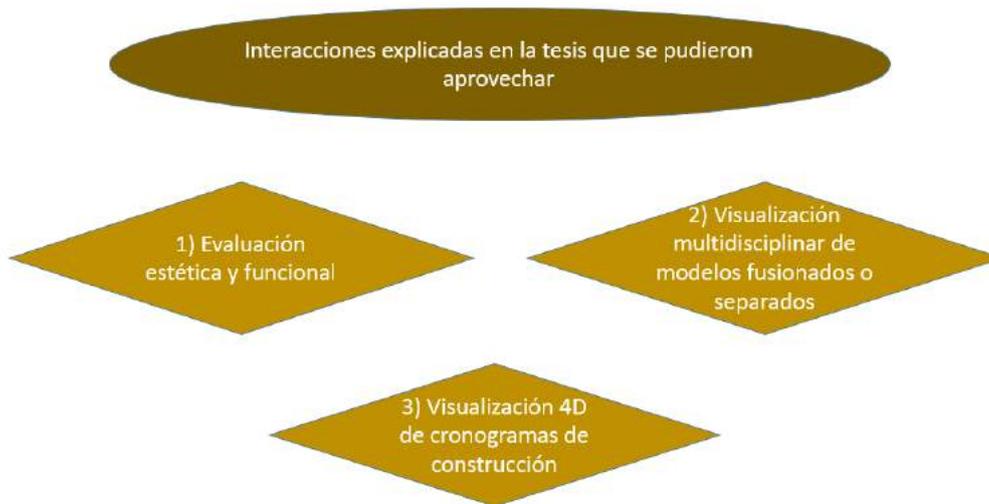


Figura 16: Interacciones Lean y BIM que no se aplicaron para el Proyecto A

Fuente: Elaboración propia

Con una evaluación estética y funcional, con la visualización multidisciplinaria de los distintos representantes de las áreas involucradas en el proyecto y con la visualización 4D de los cronogramas de construcción se pudo reducir la variabilidad en la obra, simplificar los procesos y reducir los ciclos de producción, aumentar la generación de valor, resolver y detectar con anticipación diferentes problemas que se pudieron presentar, impulsar la gestión visual, la estandarización, la utilización de procesos paralelos y el principio Lean de verificar y validar. Por ejemplo, a partir del modelado del proyecto se pudo facilitar la comprensión del proyecto y la detección de incongruencias e interferencias entre las especialidades, esto hubiera reducido los desperdicios y se habría mejorado el flujo de los procesos en la etapa de construcción.

Además, los trabajos colaborativos desde tempranas etapas del proyecto (siempre dentro de la fase de construcción) pudo darle valor al producto final del cliente y que este pueda evaluar alternativas u opciones de acabados. De esta forma, se promovía el trabajo multidisciplinario entre los participantes. Aunque ciertamente, esto también exige un presupuesto destinado a elaboración de un modelo y que sea utilizado en la fase de construcción.

También, se pudo reducir los tiempos de determinadas actividades como por ejemplo la sectorización y los metrados. Estos se pudieron realizar de manera directa a través de modelo

BIM. Por otro lado, se pudo utilizar herramientas o programas 4D que permitan mejorar el flujo del proyecto a través de la mejora en la planificación del proyecto y en el correcto control de la llegada de materiales a obra, así como controlar la cantidad de inventario de la que se dispondrá.

En general, existió desorganización ya que cada subcontratista realizó su trabajo de una forma determinada y a un ritmo determinado que muchas veces estaba desincronizado con el resto de trabajadores o con el planeamiento de la obra que si bien con la metodología Lean se intentó controlar, esto se puede impulsar aún más con la influencia de BIM. El uso de Lean también es un cambio en la forma de construir y por ende, se debieron realizar coordinaciones entre los participantes desde el inicio ya que lo que se busca es que primen los intereses globales del proyecto por encima de cualquier interés individual.

La desincronización mencionada se tradujo en el retraso en la entrega de la obra, las penalidades impuestas y en la cantidad de RFIs obtenidos a destiempo que corresponden a distintas categorías tales como incompatibilidades, un cambio en el alcance debido a un cambio en los requerimientos del cliente, consultas y sugerencias por parte de la contrata. Agregar sobre el principio de Lean que lo que se busca es tener mejoras continuas u optimizaciones que afecte a todo el proyecto y no solamente mejoras u optimizaciones locales

4.3 Proyecto B:

4.3.1 Información sobre el proyecto:

Se incluyó la metodología BIM y Lean en la etapa de construcción y los costos para este proyecto se muestran en la tabla 7. Además, la métrica obtenida de la cantidad de RFIs por m² es de 2.17, la cual es menor que del Proyecto A. En la sección 5.3.2 se realiza un análisis de los dos proyectos y la comparación de ambos se muestra en la tabla 8:

Tabla 7: Datos a analizar del Proyecto B

Costos	Proyecto B
Costo de obra contractual	S/. 16,712,984.04
Costo por adicionales	S/. 129,115.94
M2 construidos	8,434.98
RFI	183
RFI/m2	2.17

Fuente: Elaboración propia

Se observa que el porcentaje del costo de los adicionales sobre el presupuesto contractual es de aproximadamente 0.77%, además, el costo por m2 construido de los adicionales es de S/.15.31 soles. Se muestra la comparación con el Proyecto A en la tabla 8 de la sección 5.3.2.

4.3.2 Impacto en el proyecto de los RDIs

En la tabla 8 y en la figura 17 se observa que el proyecto tuvo 183 RFI, donde el 39% de ellos correspondía a la especialidad de Arquitectura, el segundo lugar lo ocupa la especialidad de estructuras con un 37 %.

Tabla 8: Cantidad y porcentajes de RFIs por áreas para el Proyecto B

Áreas	Cantidad de RFIs	Porcentaje (%)
Arquitectura	71	38.8%
Estructuras	67	36.6%
IIIE	21	11.5%
IISS	12	6.6%
Instalaciones mecánicas	12	6.6%
Total	183	

Fuente: Elaboración propia

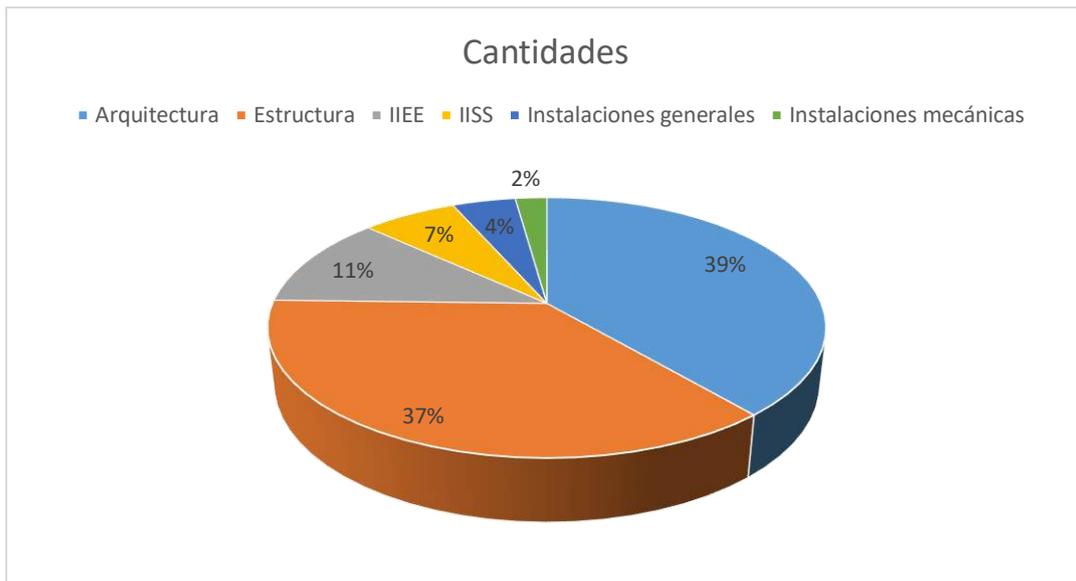


Figura 17: Porcentaje de RFIs por áreas para el Proyecto B. Fuente: Elaboración propia

Fuente: Elaboración propia

En este proyecto, los RFI también generaron un impacto económico, con un importe en adicionales de S/. 129,115.94 nuevos soles. En el Proyecto B se generaron 183 RFI y el tiempo promedio de respuesta, es decir la latencia fue de 14 días. Es importante indicar que no se postergó la fecha de entrega de la obra, lo cual muestra que puede existir una relación entre los plazos de respuesta de RFI y los plazos de entrega.

En la tabla 9 podemos apreciar resultados tanto para el Proyecto A como para el Proyecto B. Se observa que existe gran diferencia tanto en los tiempos de respuesta de los RFIs como del deductivo por penalidades.

Para el caso de las penalidades, como se mencionó en la información del Proyecto B, la empresa constructora fue la misma que la inmobiliaria, por lo que de haber existido alguna penalidad, es posible que esta no se haya contabilizado como tal.

Además, es importante analizar la métrica de RFIs/m². Por ejemplo, si ambas métricas se aplicaran a un mismo proyecto con una cantidad de m² construidos de 10,000 m², se obtendrían 266 requerimientos de información para el Proyecto A y 217 para el Proyecto B. A partir de este ejemplo, se lograrían reducir los RFIs en un 18%, un valor no muy significativo pero se

debe tener en cuenta que el modelado se realizó en la etapa de construcción. El siguiente análisis de esta métrica se realiza en el punto 5.4.1 con el Proyecto C, en el cual el modelado se realizó en la etapa de diseño.

Finalmente, se compara el costo de los adicionales en soles por m². Si bien esto depende mucho de los RDIs encontrados y de las respuesta que se obtiene por parte del cliente, se puede ver que a menor cantidad de RDIs, el costo por los adicionales tiene una tendencia a disminuir, he ahí la importancia de detectar a tiempo los RDI y en etapas previas a la construcción para así no influir abruptamente en el presupuesto que maneja el cliente.

Tabla 9: Incidencia de BIM en los Proyectos A y B

Incidencia BIM	Proyecto A	Proyecto B
Tiempo de respuesta de RFI	35	14
RFIs/m ²	2.66	2.17
Deductivo por penalidades	S/ 1,000,000.00	0
Costo adicionales por m ²	S/. 15.31	S/. 19.08

Fuente: Elaboración propia

4.3.3 Interacción de la aplicación BIM y herramientas de Lean Construction aplicadas en la etapa de construcción:

Una ventaja en este proyecto fue que la empresa encargada de vender los departamentos también fue la que llevó a cabo la construcción de estos, por lo que a pesar de que el modelado no se realizara en la etapa del diseño, las conversaciones y el trabajo en equipo por parte de los ingenieros a cargo de ejecutar la obra y los arquitectos e ingenieros que diseñaron la edificación se realizaron desde etapas tempranas. De esta forma promovía el uso de equipos multidisciplinarios y el trabajo colaborativo desde etapas tempranas del proyecto, lo cual promueve darle valor al producto final y reduce los desperdicios algo que tanto BIM y Lean buscan. En especial, se puede indicar que la participación de quienes tenían una visión de

construcción en la etapa de diseño, ayudó a que la empresa aplique Lean Project Delivery System.

La aplicación de la metodología BIM en este proyecto se debe al desarrollo del modelado 3D del proyecto en Revit en la etapa de construcción, el cual facilitó la detección de las incompatibilidades e interferencias con mayor facilidad que en el caso de buscar estas incongruencias solamente utilizando los planos en Autocad 2D. Como se mostró en el capítulo 3, el uso del modelado permitió la interacción positiva con muchos principios Lean. Por ejemplo, se redujo el desperdicio, las incertidumbres y se mejoró el flujo en etapas futuras del proyecto a partir de la detección de interferencias en el modelo 3D, además, el realizar este análisis de restricciones permitió verificar y validar la información del producto, el cual es un principio Lean. Finalmente, al encontrar incongruencias, se redujeron los re procesos y se acortaron los ciclos de producción, otro principio de Lean Construction. He ahí la importancia de realizar un adecuado “*clash checking*”, en este caso, el incluir los diferentes modelados de las diferentes especialidades, facilitó lo que ya se realizaba previamente con los planos de AutoCAD.

También, durante la construcción, los metrados para el control de avance se realizaron de manera directa del modelado, lo cual permitió agilizar y reducir los tiempos de trabajo. Esto mismo ocurrió para la sectorización, ya que se obtuvo una sectorización precisa y de manera directa a partir del modelado de la edificación. Estas dos acciones se lograron gracias a las herramientas de REVIT, al obtener una sectorización precisa, se reduce la variabilidad, tal y como se mostró en el capítulo 3. Además, al obtener metrados directos de los elementos y sectorizaciones directas, reducen las duraciones de los ciclos de producción puesto que antes los ingenieros se tomaban mucho tiempo en ejecutar estas actividades.

Finalmente, el uso de nuevos programas como el caso de REVIT que permiten crear el modelado de la edificación en 3D y utilizarlos de manera correcta en un proyecto, en los que se analiza el diseño y se toman acciones positivas en base a este, potencian el principio Lean que insiste en el uso de tecnologías confiables. Aquí se debe diferenciar que REVIT por sí solo no calificaría dentro de este principio, es clave que la organización lo adopte y lo utilice de manera adecuada y logrando buenos resultados con la aplicación de este en sus proyectos. Para el Proyecto B se considera que fue positiva la implementación, sin embargo, para que esto sea totalmente cierto, la empresa debe adoptar el modelado en todos sus proyectos. La figura 18 resume las herramientas y principios BIM aplicados:

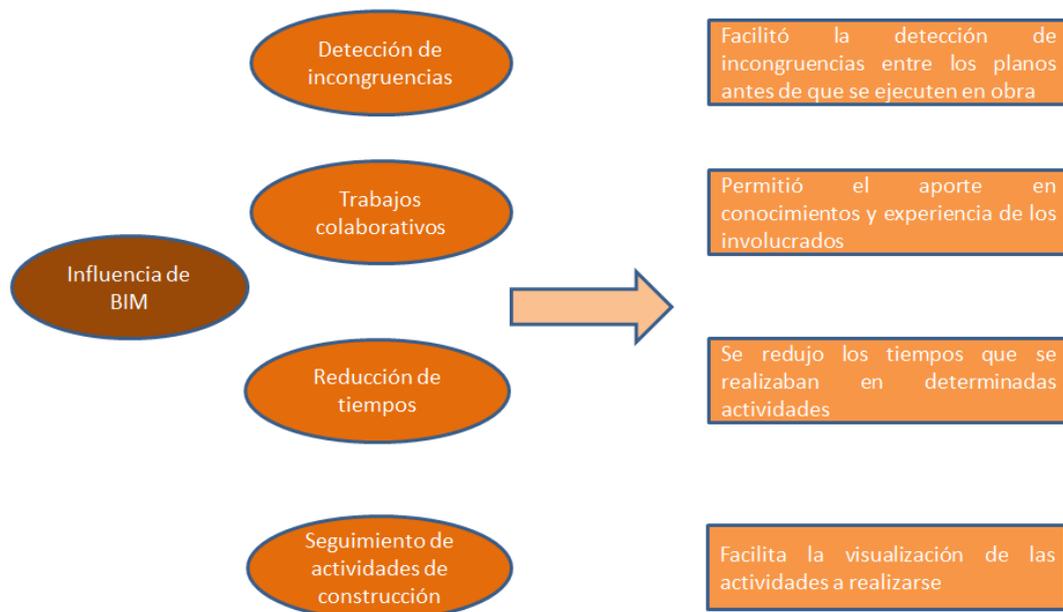


Figura 18: Influencia de BIM en la etapa de construcción.

Fuente: elaboración propia

Al igual que en el proyecto anterior, se utilizaron las herramientas del Last Planner System para el control de avance en la obra. Continuamente, los ingenieros de producción realizaban un Look Ahead de 4 semanas y una programación semanal, en la cual se analizaban todas las restricciones con la finalidad de levantarlas en el momento correcto. Finalmente, al término de

la semana se realizaba un análisis de aquellas actividades que no se hubieran realizado para que exista una retroalimentación.

Se utilizó también la sectorización para el proyecto, así como los trenes de trabajo para las distintas etapas del proyecto como la etapa de muros anclados, cimentaciones y estructuras de techos. Todo esto permitió que existan lotes de trabajo similares y que exista un flujo en los procesos. También, se utilizó el día sábado como un buffer puesto que este día no estaba considerado en el presupuesto.

4.3.4 Funcionalidades de BIM que se pudieron haber utilizado en la etapa de construcción:

A partir de la teoría, existen funcionalidades BIM que se pudieron haber aplicado en este proyecto. Una de estas funcionalidades es el uso de los software BIM y de las herramientas 4D. Actualmente, existen software o programas que pueden ayudar a mejorar el control de la planificación en obra e impulsar por ejemplo el sistema Pull y el “Just in Time”. Algunos programas BIM que permiten realizar estas mejoras son Plangrid o proplanner que facilitan la colaboración entre los participantes, permiten un mejor control de la programación así como de las entregas de materiales y las fechas de llegada a obra, entre otros beneficios.

4.4 Proyecto C:

4.4.1 Información sobre el proyecto:

Para seguir observando la influencia de BIM, se obtuvo información del siguiente proyecto que mostrará los resultados producto de la aplicación de BIM durante la etapa de diseño para el Proyecto C en el distrito de San Miguel, en la ciudad de Lima.

En este proyecto, la constructora cuenta con el respaldo de la inmobiliaria, ambas son empresas independientes pero que se complementan en sus operaciones, por lo que la relación entre

cliente y constructor fue más sencilla y facilitó la cooperación y el desarrollo de la metodología de BIM durante la etapa de diseño del proyecto. A diferencia del Proyecto B, el análisis de este proyecto se centra solamente en la etapa de diseño.

Este proyecto consistió en la construcción de un edificio multifamiliar de 20 pisos con una azotea y dos sótanos. En la tabla 10 se observa los costos para la obra, así como los m2 construidos y los RFIs se muestran a continuación:

Tabla 10: Datos a analizar para el Proyecto C

Costos	Proyecto C
Costo de obra contractual	S/13,997,118.03
Costo por adicionales	S/203,936.53
M2 construidos	8,376.47
RFI	174
RFI/m2 (%)	2.08

Fuente: Elaboración propia

La métrica obtenida para este proyecto fue de 2.08%, logrando una reducción comparándolo con el Proyecto A del 22% en la cantidad de RFIs. Lo que se buscaba era mostrar que con el modelado en la etapa de diseño, se pueden lograr reducir las cantidades de RFIs encontrados en la etapa de construcción. Si bien no es una gran cantidad de RFIs que se redujo, un valor de 22% puede resultar adecuado considerando que este fue uno de los primeros proyectos para la empresa inmobiliaria en incluir el modelado y el análisis de este en la etapa de diseño.

Se observa que el costo por m2 de los adicionales sobre el costo de obra contractual es de aproximadamente el 1.46%, mientras que el costo de los adicionales por m2 construido es de S/. 24.35 soles. Entre el motivo de estos adicionales se encuentran debido a un cambio en el alcance del proyecto que fueron solicitados por el cliente, también otros motivos son debido a

incompatibilidades detectadas por la contrata y propuestas también de ellos, las cuales, la mayoría, fueron aprobadas.

4.4.2 Impacto en el proyecto de los RFI:

El análisis de los RDIs en este proyecto fue más profundo a comparación de los dos casos anteriores puesto que fue un trabajo elaborado al final de la obra entre el coordinador de ingeniería y el jefe de diseño del proyecto en el que se buscaba conocer las causas de los RDIs. Esto es debido a que el modelado de la edificación se realizó en la etapa de diseño y se quería analizar las consultas en la etapa de construcción para ir mejorándolas de proyecto a proyecto y conocer qué tan positivo fue el uso de BIM para el Proyecto C.

La cantidad de RFIs fue de 174 y se divide en 4 categorías tal y como se muestra en la tabla 10: alcance, problemas de diseño, consulta e incompatibilidades, siendo el de mayor cantidad las incompatibilidades. Estos RDIs también influyeron en los adicionales y la mayor cantidad de los adicionales se encuentran en la categoría de problemas de diseño y consulta.

La categoría correspondiente a alcance se debe a alguna modificación que el cliente haya solicitado en cuanto a los requerimientos que brindó inicialmente; en el caso de consulta, se considera así a aquellos RDI que solicitó la contrata pero que el constructor ya contaba con la información y debió revisar el plano de detalle o también se puede deber a su inexperiencia; las incompatibilidades se deben a incongruencias de información entre las especialidades; y finalmente, los problemas de diseño son aquellas consecuencias no detectadas durante el desarrollo del diseño.

En cuanto a la categoría de consulta, la mayoría de los RDIs son los que se mencionaron en el párrafo anterior pero se debe especificar que ocurrió un factor externo que se debe al alza de la mano de obra y provocó un aumento en los jornales, este RDI alcanzó casi S/.90,000 y representa más del 57% del total para esta categoría. Además, otro valor atípico fue una

ampliación de plazo con un valor de aproximadamente S/.15,000 y que representa casi el 10% del total de esta categoría. Como se puede observar, estos RDIs no son como la mayoría de los agrupados en esta categoría y que se habían mencionado en el párrafo anterior.

Tabla 11: RFIs por categorías en el Proyecto C

CATEGORIAS	CANTIDAD DE RFIs	PORCENTAJE DE RFIs	CANTIDAD DE ADICIONALES	PORCENTAJE DE ADICIONALES	MONTO DE ADICIONALES (S/.)
ALCANCE	47	27%	20	22%	87,517
PROB. DE DISEÑO	17	10%	45	24%	160,741
CONSULTA – F.EXTERNO	56	32%	22	50%	156,543
INCOMPATIB.	54	31%	3	3%	3,974
TOTAL	174	100%	90	100%	408,775

Fuente: Elaboración propia

De la tabla 11, se ve que para este proyecto el monto en la categoría de incompatibilidades fue bajo en consideración a los otros tres. Esto se debe a que para este caso, la mayoría de los RDIs de la categoría incompatibilidades se corregían a partir de una aclaración o una modificación pequeña en los planos que no ponía en riesgo un cambio significativo. En cambio, para las otras tres categorías, los RDIs involucraban cambios en el alcance del proyecto que podían ser cambios en los departamentos o uso de nuevos materiales, así como problemas de diseño que involucraban cambios de espesores de muros o se añaden nuevos elementos por solicitud de la inmobiliaria que no estaban presupuestados que inciden en el monto de los adicionales.

De la tabla 12, en cuanto al porcentaje correspondiente a la categoría de incompatibilidades, se cuenta con un registro de cada área y la cantidad de incompatibilidades que se detectaron de esta junto con las otras áreas:

Tabla 12: RFIs de la categoría de incompatibilidades en el Proyecto C

ESPECIALIDAD	CANTIDAD	PORCENTAJE
Arquitectura - Estructuras	16	30%
Estructuras	9	17%
I. Sanitarias	6	11%
Inst. Eléctrica	6	11%
Arquitectura	5	9%
Arquitectura-Sanitarias	3	6%
I. Sanitarias - Estructuras	2	4%
Arquitectura - I. Eléctrica	2	4%
Gas	1	2%
I. Eléctricas - I. Sanitarias.	1	2%
Seguridad - IIEE.	1	2%
Eléctricas-Estructuras	1	2%
Arquitectura-Gas	1	2%
TOTAL:	54	100%

Fuente: Elaboración propia

En este sentido, es la especialidad de arquitectura y estructuras las que mayor porcentaje de incompatibilidad presentan con el resto de áreas, esto se debe posiblemente a la gran cantidad de detalles que incluyen ambos planos y que seguramente no se cuenta con una herramienta eficaz que detecte estos errores durante el diseño.

Por otro lado, en la tabla 13, en cuanto a RDIs relacionados a la categoría de alcance, se encuentra que el mayor de estos existió en el área de arquitectura con un porcentaje de 55%, sin tomar en cuenta el porcentaje que representan aquellos requerimientos de información de la relación entre el área de arquitectura y el resto de especialidades.

Tabla 13: RFIs de la categoría de alcance en el Proyecto C

ESPECIALIDAD	CANTIDAD	PORCENTAJE
Arquitectura	26	55%
Instalaciones Sanitarias	7	15%
Arquitectura y Estructuras	6	13%
Estructuras	4	9%
Instalaciones Eléctricas	2	4%
Instalaciones Gas	1	2%
I. Eléctrica - I. Comunicación.	1	2%
TOTAL	47	100%

Fuente: Elaboración propia

Con respecto a los problemas de diseño, la tendencia continúa ya que es la especialidad de arquitectura nuevamente la que mayor participación cuenta, con aproximadamente 50% de incidencia, esto se muestra en la tabla 14.

Tabla 14: RFIs de la categoría de problemas de diseño en el Proyecto C

ESPECIALIDAD	CANTIDAD	PORCENTAJE
Arquitectura	8	47%
Instalaciones Sanitarias	4	24%
Arquitectura y estructuras	2	12%
I. Sanitarias y Arquitectura	1	6%
Gas	1	6%
Instalaciones Eléctricas	1	6%
TOTAL	17	100%

Fuente: Elaboración propia

A partir de la información obtenida, se pudo identificar que la mayor influencia en los RDIs corresponde a la categoría de arquitectura, la que se elabora en la etapa de diseño, entonces es muy importante prestarle más atención a esta etapa.

Las causas de los RFIs fueron variadas y corresponden a un análisis realizado sobre cada una de ellas. Las respuesta brindadas por la inmobiliaria permitían conocer las causas que generaban los RDIs, en algunos casos era solamente necesario alguna aclaración con respecto a la que se solicitaba, en otros, fue necesario realizar la compatibilización y realizar las

modificaciones correspondientes cuando se trataba de problemas de diseño y compatibilidad. Las causas encontradas fueron varias y permiten identificar qué se debe mejorar en futuros proyectos para reducir la cantidad de RDIs.

Como se mencionó al inicio, el coordinador de ingeniería y el jefe de diseño del proyecto buscaban reconocer y agrupar los diferentes tipos de RDIs y ver qué tan positivo fue el uso del modelado en el diseño, ya que se realizaron reuniones ICE y reuniones colaborativas que justamente crean valor y lo ideal que no siempre va a ocurrir es que se disminuyan todos los RDIs desde el modelado.

La figura 19 muestra las causas encontradas, se puede ver que el modelado influye en algunas de ellas como es el caso de las carencias de herramientas de modelación, diseños incompletos o en la falta de herramientas de detección de errores; mientras que otras son producto ya de temas que se alejan del alcance del modelado como es el caso de la interpretación de los planos, inexperiencia del constructor o falta de comunicación y problemas de calidad en diseños.

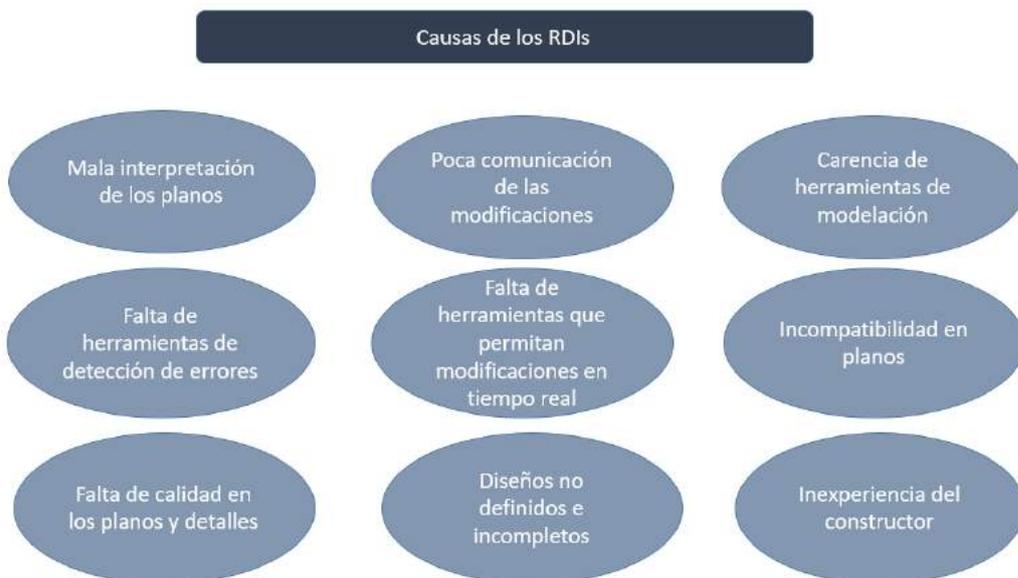


Figura 19: Causas de los RDIs en el Proyecto C

Fuente: Elaboración propia

5.4.3 Interacción de la aplicación BIM y herramientas Lean aplicadas en la etapa de diseño:

Como se mencionó antes, a diferencia del Proyecto B el modelado de este proyecto se realizó en la etapa de diseño, lo que permitió reducir la cantidad de RDIs que se encontraron en la etapa de construcción al poder obtener una mejor visualización de la edificación. Esta detección de interferencias en etapas tempranas mejora el flujo del proyecto en la construcción y reduce los desperdicios

Además, permitió que el cliente pueda ver detalles de la arquitectura como la distribución de los ambientes y lo cual le permite realizar las modificaciones que crea adecuadas, así como evaluar diferentes alternativas de diseño y de materiales antes de que se ejecute la obra. También, el evaluar diferentes alternativas de diseño permite que se evalúe también el cambio de precios entre las diferentes opciones que se encuentren. Todo esto reduce la variabilidad a partir de la generación de valor del producto final.

Por ejemplo, durante la etapa de diseño y en las reuniones colaborativas se tenía que la base de la cimentación de las zapatas y cimientos corridos se encontraba a una altura considerable (nivel de desplante) del nivel de falso piso del último sótano esto porque el estudio de suelos señalaba una cota profunda para que el terreno sea capaz de soportar la capacidad portante de la estructura. Es por ello, que se analizó una alternativa con el uso de micropilotes, incluso se llegó a coordinar con la subcontratista pero el costo evaluado no terminó de convencer al equipo del proyecto. Finalmente, se decidió incluir un semisótano para que la profundidad de cimentación de las zapatas y cimientos corridos baje y llegue a la cota debida.

Este análisis que se realiza en la etapa de diseño, en el que se coordina directamente con el cliente o con otros subcontratistas y se evalúan diferentes opciones que involucran cambios en

el diseño del proyecto con los respectivos costos implicados es el que influye justamente en la creación de valor del producto y es una interacción clara entre BIM y Lean Construction

Además, una de las funcionalidades de REVIT es que al realizar alguna modificación en algún elemento del modelado, esta modificación se realiza en todos los elementos que estén vinculados a este o que sean de la misma familia. Entonces, al momento de realizar modificaciones en la etapa de diseño, se logra reducir la variabilidad del producto.

La figura 20 muestra de manera gráfica las interacciones que se dieron en el proyecto en la etapa de diseño:

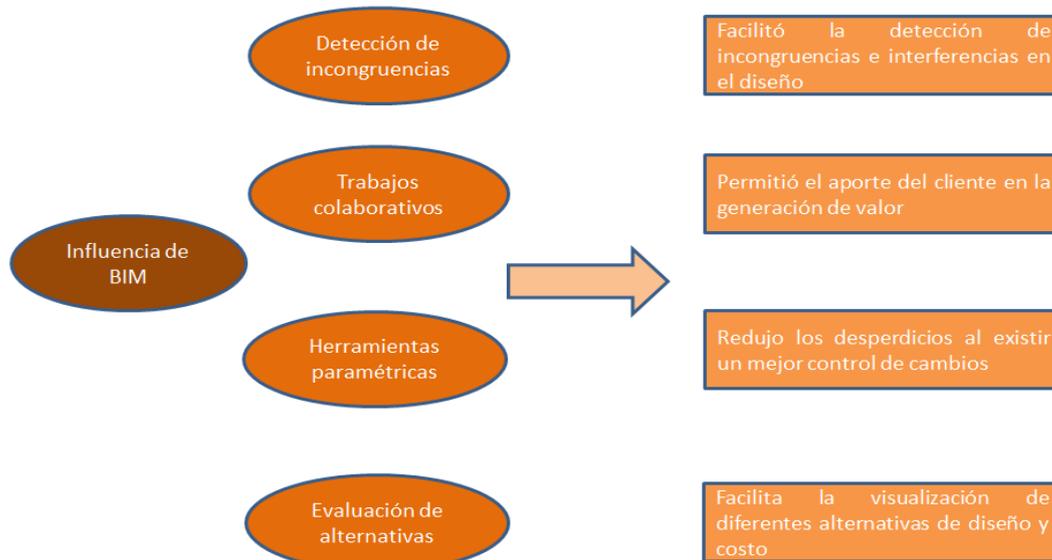


Figura 20: Influencia de BIM en el diseño.

Fuente: elaboración propia

4.4.4 Funcionalidades de BIM que se pudieron haber utilizado en la etapa de diseño:

Este proyecto en la etapa de diseño aplicó los conceptos que se colocaron en la tesis sobre cómo ejecutar un proyecto BIM y un proyecto Lean. Por ejemplo, se desarrollaron reuniones ICE y

reuniones colaborativas que involucraban a los diseñadores, cliente y el equipo encargado de ver la viabilidad del proyecto con la finalidad de crear valor y reducir los desperdicios.

Los diferentes enfoques, como es el caso del Target Value Design, fomentan que se incluya en la etapa de diseño, para la creación de valor, a todos los “*stakeholders*” del proyecto. Bajo ese sentido, se pudo incluir también a los subcontratistas encargados de la ejecución de diferentes especialidades ya en la etapa de construcción. Por ejemplo, la contrata encargada de ejecutar las IIEE pudo haber participado en el diseño, realizar su modelado correspondiente y superponerlo al modelado de arquitectura y así opinar según su experiencia diferentes opciones u observaciones que haya podido encontrar.

Además, sería necesario que cada área u especialidad del proyecto sea la que elabore su propio modelado de la edificación para luego integrar estos modelos en uno general. Un proyecto mejor elaborado se lograría a partir de incluir a personal con los criterios técnicos y la experiencia en su área al momento de realizar los modelos para que ellos guíen al diseñador sobre posibles diseños que no tomen en cuenta la constructabilidad.

Esto sin embargo, es complicado, ya que se elige a los diversos subcontratistas ya en la etapa de construcción, en muchos casos aún no se termina de cerrar la licitación para las diversas especialidades por lo que se hace difícil de lograr en los actuales proyectos de construcción en nuestro país.. También, en muchos casos los subcontratistas no cuentan con la tecnología o el personal capacitado para poder elaborar los modelados, por lo que aún falta mucho esfuerzo también por parte de los subcontratas para que ellos también puedan ser parte de un proyecto BIM.

4.5 Resumen de interacciones BIM y Lean encontradas

Finalmente, en la tabla 15 a forma de resumen se muestran las interacciones presentadas para los 2 casos en los cuales se implementó la metodología de BIM.

Se observa que el implementar BIM en la etapa de diseño aumenta la cantidad de interacciones relacionadas a la creación de valor y mejora del flujo. Por otro lado, el utilizarlo en la etapa de construcción es un segundo filtro que sigue aumentando los dos principios mencionados y además se muestran interacciones adicionales.

Tabla 15: Resumen de interacciones encontradas

Fuente: Elaboración propia

Principios Lean	Interacciones con BIM encontradas	
	Proyecto C (etapa de diseño)	Proyecto B (etapa de construcción))
Mejora del flujo	1) Mediante la detección de incongruencias en etapas previas a la ejecución en campo, se reducen los retrabajos. 2) Existe un filtro de detección de interferencias en el diseño ya que en la etapa de construcción se realizó otro	Mediante la detección de incongruencias en etapas previas a la ejecución en campo, se reducen los retrabajos
Reducción de la duración de los ciclos de producción	Realizar sesiones de ingeniería concurrente (ICE) junto con el análisis de un modelo acelera el proceso de diseño.	Al realizar metrados directos y sectorizaciones directas.
Creación de valor y reducción de la variabilidad	1) La detección de incongruencias redujo la variabilidad. 2) Se creó valor a partir de la evaluación de diferentes alternativas de diseño y costos con la colaboración de los “ <i>stakeholders</i> ”	La reducción de incongruencias redujo la variabilidad. Fomentó el trabajo colaborativo y el uso de equipos multidisciplinarios
Verificar y validar	Se verificó la congruencia entre las especialidades mediante un modelo federado.	Se realizó un análisis que permitió verificar y validar la información del producto antes de ejecutarse en campo
Uso de tecnologías confiables	Mediante el uso de software de modelado como el caso de REVIT y Naviswork y su correcta aplicación en el proyecto	Mediante el uso de software de modelado como el caso de REVIT y su correcta aplicación en el proyecto

Estas son las interacciones que se pudieron detectar, seguramente existen más interacciones entre los principios de Lean que se pudieron haber beneficiado con las funcionalidades de

BIM a lo largo de todo el proyecto puesto que el análisis hace referencia solo al diseño en un proyecto y a la construcción en otro.

Está claro que aún hace falta mucho trabajo y más esfuerzo para que las interacciones se sigan dando y sean mejores con el tiempo. El sector de la construcción es muy diferente al sector industrial donde todo es más repetitivo y sigue un patrón, en cambio en la construcción existe mucha variabilidad y el uso de programas informáticos como el caso de REVIT son parte ya de la metodología BIM.

La industria necesita que se desarrollen programas que permitan la interacción en tiempo real entre todos los participantes del proyecto y que sean fáciles de utilizar. Estos deben estar orientados a no solo ejecutarse en una computadora, sino que también sean de fácil utilidad en un smartphone o tablet y que se permita realizar algunas tareas como programar tiempos de entrega, programar avances del proyecto, detectar en los planos RDIs, comprometer al resto del equipo en la ejecución de determinadas actividades que son tareas que actualmente toman tiempo en ejecutarse y que de poder realizarse en un celular, sería más factible.

Por otro lado, diferentes empresas alrededor del mundo están invirtiendo dinero en tecnología orientada a la construcción. Por nombrar un caso, se planea el uso de drones ya que estos pueden ser una herramienta clave para la ejecución de tareas 3D puesto que brinda un panorama de toda la obra. Es por ello, que se debe seguir invirtiendo en el rubro de la tecnología para lograr un sector de construcción más controlado, con menos variabilidad e incertidumbre.

CAPITULO 5.0 Conclusiones y recomendaciones:

5.1 Conclusiones

- Como conclusión principal se obtiene que BIM influencia positivamente en los proyectos de edificación y potencia los principios teóricos y prácticos de Lean Construction. Sin embargo, los resultados positivos dependen de mucho esfuerzo, dedicación, aprendizaje y retroalimentación en el tiempo por parte de la empresa encargada de la adopción BIM, así como de la experiencia y el correcto proceder del equipo de trabajo elegido para la ejecución de la obra para obtener resultados y mejoras positivas en el tiempo.
- Se observó en los proyectos B y C que independientemente de la etapa en la cual se realice el modelado, utilizarlo correctamente y con anticipación para la detección de incongruencias permite la mejora en el flujo del proyecto, así como la creación de valor y la reducción de la variabilidad. Siendo de mayor eficiencia el utilizarlo previamente en el diseño porque permite que exista un filtro antes de que se revise la estructura en 3D por el equipo encargado de la ejecución de la obra.
- El uso del modelado y el análisis de costos y alternativas de diseño antes de la etapa de construcción permite la creación de valor como ocurrió en el caso del Proyecto C, en el que se evaluaron diferentes tipos de cimentaciones para cumplir los requisitos geotécnicos del proyecto. Esto permitió elegir la alternativa que presentaba el menor costo y la mejor solución encontrada por los participantes.
- El uso de programas nuevos como Naviswork y Revit tienen herramientas muy útiles que permiten reducir los tiempos de duración de determinadas actividades que antes les tomaban tiempo a los ingenieros como es en el caso de los metrados y la sectorización. Además, la posibilidad de integrar todos los modelos en uno solo y de comprobar los requisitos mediante la visualización, potencia el principio Lean de verificar y validar.

- Se observa que para los casos analizados, la métrica por la cantidad de RDIs encontrados en la etapa de construcción fue menor en los dos proyectos BIM (B y C) a comparación del proyecto que solamente manejó Lean (Proyecto A), por lo que la influencia del modelado y del trabajo colaborativo se vio reflejado en menos incongruencias.
- En el proyecto A, en el que solamente se utilizaron las herramientas de Lean, no se aplicaron correctamente las herramientas del Last Planner System, esto va más allá del uso de la metodología señalada, la cual se usa de manera correcta en muchos otros proyectos de construcción en el país. Al igual que Lean, BIM pudo haberse aplicado correctamente o no en este proyecto, por lo que al final, los resultados van a depender de la forma en que los profesionales ejecuten las metodologías.
- En los proyectos se analizó una métrica que indica la cantidad de RFIs por m². El porcentaje fue menor para el Proyecto C, lo cual era de esperarse puesto que se realizaron reuniones colaborativas entre los participantes para crear valor y para que exista la menor cantidad posible de requerimientos de información posteriores. Por lo tanto, existe una reducción en la cantidad de RDIs que se encontrarán en la etapa de construcción si es que el modelado y la búsqueda de valor se realiza en etapas iniciales. La reducción encontrada entre el Proyecto C y el proyecto A fue de 22%, la cual no parece una reducción significativa. Sin embargo, se debe considerar que el uso del modelado en el Proyecto C fue uno de los primeros proyectos que se realizaron de esta manera en la empresa analizada, por lo que para lograr una reducción aún mayor se debe continuar con este trabajo en proyectos posteriores y buscar de esa manera una mejora continua.
- El costo promedio elevado, en el caso de los RFI de proyectos realizados exclusivamente con Lean, puede generarse debido a la detección de estas solicitudes de

forma tardía y la demora en los tiempos de respuesta. Esta demora o deficiencia al momento de detectar los RFI, cuando afectan a una partida que influye en la ruta crítica, provocan un mayor costo en el presupuesto del proyecto. En los proyectos con BIM, estas interferencias son advertidas de forma temprana, evitando estos re trabajos, o permitiendo la oportuna intervención de los especialistas, para su solución. Asimismo, BIM también advierte de los pequeños problemas que se pueden evidenciar cuando el modelo del proyecto es visto en 3 dimensiones. Ahora, como se ha podido observar en los proyectos analizados en esta tesis, es muy importante la experiencia de los involucrados en analizar el proyecto ya que la inexperiencia puede ocasionar que no se detecten a tiempo estos errores y recién sean detectados en la etapa de construcción.

- Para que se vea un cambio real de la influencia de la metodología de BIM en un proyecto de construcción, es necesario que todos los colaboradores del proyecto trabajen de una forma integrada desde la etapa de diseño del proyecto. Esto se demuestra en el caso de estudio número 3 para el Proyecto C, en el cual, los involucrados trabajaron desde el diseño y el número de RFI fue menos a los dos casos anteriores provocando menos influencia en el costo de la obra.
- Los adicionales que se generen los va a asumir el propietario del inmueble, este importe afecta el perfil económico del proyecto, así como la utilidad de los inversionistas. Es trascendental indicar que mientras más temprano se detecten las incompatibilidades, se podrán tomar medidas correctivas a tiempo para reducir los sobrecostos del proyecto. En el caso del contratista, estos adicionales generan una ganancia añadida a la prevista, sin embargo, es importante tener el control del proyecto, de lo contrario se podrían generar grandes pérdidas o reajustes en las utilidades proyectadas para el proyecto.
- La metodología BIM posee muchas similitudes con los principios del Lean Construction, se podría decir que es un complemento del mismo. Por ejemplo, impulsa

el enfoque en el cliente, la retroalimentación a través de la participación de los diferentes involucrados, fomenta la estandarización, el trabajo por bloques repetitivos, la organización, eliminación de residuos y la mejora continua. Además, durante la construcción, es posible potenciar e incluso mejorar las herramientas del Last Planner System al permitir la visualización de lo programado de forma virtual y la vinculación por ejemplo, del Diagrama Gantt en los cronogramas 4D. Además, influye en acelerar los tiempos que se tomaban al realizar ciertas gestiones manualmente, tales como la sectorización ya que BIM a través de una iteración da una respuesta automática.

5.2 Recomendaciones

Algunas recomendaciones para el constructor son las siguientes:

- Los involucrados en el proyecto deben revisarlo de forma exhaustiva para realizar un buen análisis de posibles incompatibilidades, incongruencias con otras áreas del proyecto, errores de diseño, falta de detalles para agilizar los trabajos de campo y evitar pérdida de tiempo en la espera de los RFIs.
- En caso se encuentren incompatibilidades, durante la etapa de construcción, estas deberán ser informadas de manera inmediata a través de RFI, además, se deberá solicitar una pronta atención. En caso de no tener respuesta, se deberá monitorear el tiempo transcurrido y alertar de su impacto en los trabajos, si es factible se deberá dar una propuesta técnica para su absolución con su respectivo costo y plazo.
- Las empresas del sector construcción deben actualizarse con respecto a la metodología BIM para cambiar los errores frecuentes en los sistemas actuales de construcción. Además, el uso de esta metodología debe ser una política impulsada por el Estado y exigida en los proyectos de construcción, tal y como ocurre en países desarrollados.

Algunas recomendaciones para el cliente son las siguientes:

- Realizar un proyecto de edificación en el cual involucre directamente a la empresa constructora (o al menos un miembro del equipo debe tener experiencia de construcción) desde la etapa de diseño del proyecto para que exista una comunicación temprana entre los arquitectos y los ingenieros.
- Considerar un monto adicional en el proyecto que incluya y que exija a la empresa constructora de contar con personal capacitado y especialista y que se dediquen netamente a desarrollar, impulsar y fomentar la metodología de BIM en el proyecto.
- Participar directamente en todas los cambios del proyecto que se tomen debido a los RFI presentados por la empresa constructora y que involucren algún cambio en el alcance del proyecto, modificación de elementos de arquitectura, cambio en los acabados para que se mantenga el producto final.

Algunas recomendaciones para los diseñadores son las siguientes:

- Buscar la participación del resto de involucrados en el proyecto y de especialistas de las diferentes áreas para que a partir de sus conocimientos técnicos y de su experiencia puedan dar su punto de vista sobre el modelado que se ha desarrollado. Promover las reuniones de ingeniería concurrente. Evitar la fragmentación del trabajo estableciendo un flujo de trabajo transparente y de interacción entre los involucrados.
- Tratar de ser lo más claros posibles en los diseños para evitar RDIs que sean debidos a causas relacionadas a una baja calidad de los planos por tener diseños que no son claros y con muchas interferencias. Considerar en todo momento el concepto de constructabilidad en los diseños planteados.
- En el proceso de diseño incluir el análisis de diferentes alternativas de diseño que en Lean Project Delivery System es llamado Set Based Design que ayudan a elegir la mejor alternativa. Como parte del proceso de elección ayuda incluir metodologías BIM para el análisis de las alternativas.

BIBLIOGRAFIA:

- ACCA software (s/f). Nacimiento del BIM y el modelo virtual según Eastman. Obtenido de: <<http://biblus.accasoftware.com/es/nacimiento-del-bim-eastman/>>
- AEC, A unified standard for the Architectural, Engineering and Construction industry in the UK (2014). AEC (UK) committee reconvenes for next phase of UK BIM adoption. Disponible en <https://aecuk.wordpress.com/2014/09/19/aec-uk-committee-reconvenes-for-next-phase-of-uk-bim-adoption/>
- AIA California Council. (2007). Integrated project delivery: A guide. The American Institute of Architects (AIA), California Council. Obtenido de: https://info.aia.org/SiteObjects/files/IPD_Guide_2007.pdf
- American Institute of Architects (2003). Implementación BIM en empresas de diseño y construcción. <<https://www.eadic.com/implementacion-bim-en-empresas-de-diseno-y-construccion/>>
- Andreassen, C. (2015). 4D scheduling vs 4D visualization. Obtenido de: <<http://blog.synchroltd.com/4d-scheduling-vs.-4d-visualization>>
- Bae Seo, M. Ju Beom, K. (2012). A Study on the Issue Analysis for the Application of BIM Technology to Civil Engineering in Korea. Obtenido de: <<https://pdfs.semanticscholar.org/18f0/c4b7f8f5ca79afd921149720a52504438526.pdf>>
- Ballard, G. & Howell, G (2003). Lean Project Management. University of California at Berkeley, Berkeley, CA, USA.
- Banna, M. (2017). 6 Principles in Lean Construction. Obtenido de: <<https://blog.kainexus.com/improvement-disciplines/lean/lean-construction/6-principles-of-lean-construction>>

- Beesley, C. (2014). The importance of BIM Standards. Obtenido de: <<http://www.dlt.com/blog/2014/04/28/importance-bim-standards/>>
- BIM Summit 2018 Management & Technology. (s.f.). Avances de la adopción BIM en el Perú. Obtenido de: <<http://bimsummit.pe/avances-de-la-adopcion-bim-en-el-peru/>>
- British Standard Institution (s/f). Building Information Modelling (BIM). Obtenido de <<https://www.bsigroup.com/en-GB/Building-Information-Modelling-BIM/>>
- CAPECO (2003). Costos y Presupuestos en Edificación. Obtenido de: <https://www.academia.edu/31773172/Costos_y_Presupuestos_en_Edificacion_CAPECO>
- Carbajal, G. & Bermudez D. (2017). “First Run Studies y Optimización de Procesos en la Construcción de Muros Anclados (Tesis de pregrado). Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.
- Construction Institute CII (2005). Lean Principles in Construction. Obtenido de: <<https://www.construction-institute.org/resources/knowledgebase/knowledge-areas/design-planning-optimization/topics/rt-191>>
- Criminale, A. Langar. S (2017). “Challenges with BIM implementation: A review of Literature. En 53rd ASC Annual International Conference Proceedings. Obtenido de: <https://www.researchgate.net/publication/317842173_Challenges_with_BIM_Implementation_A_Review_of_Literature>
- Doanh Do (s/a). “An introduction to Set-Based Design”. Lean Construction Blog. Obtenido de: <[https://leanconstructionblog.com/introduction-to-set-based-design.html#:~:text=Set%2Dbased%20Design%20\(SBD\),and%20construction%20\(AEC\)%20industry.&text=Known%20as%20point%2Dbased%20design,greater%20detail%20of%20the%20concept.](https://leanconstructionblog.com/introduction-to-set-based-design.html#:~:text=Set%2Dbased%20Design%20(SBD),and%20construction%20(AEC)%20industry.&text=Known%20as%20point%2Dbased%20design,greater%20detail%20of%20the%20concept.)>
- Eastman, C. Teicholz, P. Sacks, R. Liston, K. (2011). Bim Handbook: A guide to Building Information Modelling, New Jersey-Estados Unidos, John Wiley & sons.

- Eastman, C. Teicholz, P. Sacks, R. Liston, K. (2008). Bim Handbook: A guide to Building Information Modelling, New Jersey-Estados Unidos, John Wiley & sons.
- Escuela de diseño de Madrid (s/f) ¿Cómo funciona un software BIM? Obtenido de: <<https://esdim.com/como-funciona-un-software-bim/>>
- EspacioBIM (2016). ¿Qué es el LOD?. Obtenido de: <<https://www.espaciobim.com/ques-el-lod-nivel-de-detalle>>
- Fischer, Reed, Khanzode, Ballard (2006). A Guide to Applying the Principles of Virtual Design & Construction (VDC) to the Lean Project Delivery Process. Stanford. USA
- Forbes & Ahmed (2011). Modern Construction: Lean Project Delivery and Integrated Practices. Boca Raton, FL: CRC Press
- Garber, R (2014). “BIM DESIGN: Realising the Creative Potential Of Building Information Modelling” Chichester, West Sussex, UK. Obtenido de: <<https://books.google.com.pe/books?id=L6icCQAAQBAJ&pg=PA128&lpg=PA128&dq=computer+controlled+fabrication+BIM&source=bl&ots=nAR79k-d17&sig=ACfU3U0LFkx8SF8OjW5yzJ-FOuBIkyCJ6A&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwiuz7PVw57kAhXLtlkKHU1JAvwQ6AEwD3oECAoQAQ#v=onepage&q=computer%20controlled%20fabrication%20BIM&f=false>>
- Guzmán & Suárez (2011) La Filosofía Lean Construction. arte i- Edifica. Capítulo Peruano del Lean Construction Institute (LCI). Obtenido de: <<https://es.slideshare.net/GrupoEdifica/presentacion-pucp-lean-construction-parte-i-edifica>>
- Hildebrandt Gruppe (2015) ¿Qué es REVIT y para qué sirve en el modelado BIM. Obtenido de: <<http://www.hildebrandt.cl/que-es-revit-y-para-que-sirve-en-el-modelado-bim/>>

- IAALTTA arquitectos e ingenieros. Programación BIM 4D. Obtenido de: <<https://www.iaa-bim.com/servicios-bim/programacion-bim-4d/>>
- Jones, D. Womack, J. (2003). Lean Thinking. Obtenido de: <<https://www.equipu.pe/dinamic/publicacion/adjunto/9788498751994-1487259555GbdqWG.pdf>>
- Khanzode, A., Fischer, M., Reed, D., and Ballard, G. (2006). “A Guide to applying the Principles of Virtual Design & Construction (VDC) to the Lean Project Delivery Process” CIFE, Standford University, Palo Alto, CA.
- Khemlani, L (2009). “Sutter Medical Center Castro Valley: Case Study of and IPD Project” AECBytes, Obtenido de: <http://www.aecbytes.com/buildingthefuture/2009/Sutter_IPDCaseStudy.html>
- Ki Beom Ju y Myoung Bae Seo (2013). A Study on the Interopetability Between Drawings and BIM-Based 3D Drawings. Korea Institute of Construction Technology, Republic of Korea
- Lauri Koskela (1992). “Applications of The New Production Philosophy to Construction”. Stanford University. USA
- Koskela, L. Howell, G. Ballard, G. Tommelein, I (2002). “The Foundations of Lean Construction”. Publicado en: Design and Construction: Building in Value.
- Koskela,L. Kiviniemi,A. Tzortzopoulos,P. Dave,B. (2013). *Implementing Lean in Construction*, Londres-Inglaterra, CIRIA Classic House.
- Koskela, L. Sacks, R. Dave, B. (2010). Interaction of Lean and Building Information Modelling in Construction. Publicado en: Journal of Construction Engineering and Management
- Lichtig, W. A. (2005). Sutter health: Developing a contracting model to support lean Project Delivery. Lean Construction Journal, 105-112.

- Lean Construction Institute LCI (s/f). ¿What is Lean Design and Construction?. Obtenido de: <<https://www.construction-institute.org/resources/knowledgebase/knowledge-areas/design-planning-optimization/topics/rt-191>>

- Liu, R. Issa, R. (2013). Issues in BIM for Facility Management from Industry Practitioners' Obtenido de: <https://www.researchgate.net/publication/268471356_Issues_in_BIM_for_Facility_Management_from_Industry_Practitioners'_Perspectives>

- LucidChart (s/f). “¿Qué es un mapeo de procesos?”. Obtenido de: <<https://www.lucidchart.com/pages/es/como-crear-un-mapa-de-procesos>>

- Migilinskas, D. Popov, V. Juocevicius, V. Ustinovichius, L. (2013). “The benefits, obstacles and problems of practical Bim Implementation” en 11th International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques MBMST 2013. Obtenido de: <https://www.researchgate.net/publication/257726942_The_Benefits_Obstacles_and_Problems_of_Practical_Bim_Implementation>

- Moreno G. (s.f) Implementación BIM en la etapa de diseño. Obtenido de: <<https://www.equipu.pe/dinamic/publicacion/adjunto/1488493364BI0k6IIHao.pdf>>

- National Institute of Building Science (2015). National BIM Standard-United States. Obtenido de: <http://www.nationalbimstandard.org/files/NBIMS-US_FactSheet_2015.pdf>

- Notas y apuntes (2016) Método “Just in time” – “Justo a tiempo” – Gerencia de proyectos de construcción. Obtenido de: <<http://ingcivil-notasapuntes.blogspot.com/2016/06/gerencia-de-proyectos-de-construccion.html>>

- Renders Factory (2018). “¿Qué es Revit de Autodesk y para qué sirve? Obtenido de: <<https://www.renderfactory.es/que-es-revit-de-autodesk-y-para-que-sirve/>>

- Richsmoller, L. Koskela, L. Alarcon, L (2006). Improving Value Generation in the Design Process of Industrial Projects Using CAVT. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago de Chile

- Ruano, D. (2010). Análisis de los plazos de construcción de edificios en Chile y su relación con los métodos constructivos utilizados. Tesis de pregrado. Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile.

- Rui Liu & Raja R A Issa (2013). Issues in BIM for Facility Management from Industry Practitioners Perspective. University Of Florida. USA

- Rundel, R. (2005). “Adequate software education for your design team helps ensure success with building information modeling” en Catalyst. Obtenido de: <<http://www.cadalyst.com/aec/implementing-bim-part-3-staff-training-2920>>

- Sulankivi, K. Tauriainen, M. Kiviniemi. M. (2014). Safety Aspect in constructability analysis with BIM. Paper académico. Finland: Aalto University, School of Engineering

- Sacks, R., Treckman, M., and Rozenfeld, O. (2009). “Visualization of Work Flow to Support Lean Construction.” Journal of Construction Engineering and Management, 135(12),1307-1315.

- Sacks, R., Koskela, LJ. Dave, B., Owen, R. (2010) “The interaction of lean and building information modeling in construction”. Artículo de University of Salford, Manchester.

- Taboada, J., Alcántara, V., Lovera, D., Santos, R., Diego, J. (2011) “Deteccion de interferencias e incompatibilidades en el diseño de proyectos de edificaciones usando tecnologías BIM” Obtenido en: <<http://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/iigeo/article/viewFile/672/526>>

- The Realignment Group. (s.f.). Target Value Design. Obtenido de: <<http://www.projectrealign.com/index.php/lean-services/target-value-design>>

- Villanueva-Meyer (s/f). “ESPACIOS COLABORATIVOS EN EL DISEÑO Y LA CONSTRUCCION DE PROYECTOS COMPLEJOS”. Obtenido de: <<http://www.galenusrevista.com/?Espacios-colaborativos-en-el>>
- Winter, M, Smith, C, Morris, P and Svetlana, C (2006) “Directions for future research in project management: the main findings of a UK Government-funded research network”, International Journal of Project Management, vol 24, 8, Elsevier Science, UK, pp 638– 649
- Womack y Jones (1996). “Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation”. New York, NW.



ANEXOS

ANEXO 1: Explicación de las celdas de la matriz de interacción

Número	Explicación
1.	Una apreciación adecuada del diseño en etapas tempranas junto con una evaluación del diseño contra los requisitos de energía, acústicos, termales, etc, mejoran la calidad del producto final, esto reduce la variabilidad durante la etapa de construcción.
2.	El hecho de realizar un modelado ayuda a los diseñadores porque de esta forma detectan fácilmente errores o fallas en los diseños que evitan futuros re trabajos en el campo como resultado de un diseño incompleto.
3.	Los sistemas de construcción son cada vez más complejos. Incluso los profesionales capacitados tienen dificultades para generar modelos mentales precisos solo con dibujos. BIM simplifica la tarea de comprender el diseño, lo que ayuda a los planificadores de construcción a lidiar con productos complejos.
4.	Como todos los aspectos del diseño se capturan en un modelo 3D que el cliente puede comprender fácilmente, los requisitos se pueden capturar y comunicar de manera exhaustiva ya durante la etapa de desarrollo del concepto. Esto también puede empoderar a más partes interesadas del proyecto para participar en la elaboración del diseño.
5.	La creación virtual de prototipos y simulación debido a la inteligencia incorporada en los objetos del modelo permite la verificación automática de las normas de diseño y construcción, lo que a su vez hace que la verificación y validación del diseño sea más eficiente.
6.	Con BIM se puede visitar virtualmente el proyecto y el lugar de trabajo. Con los objetos que contienen inteligencia e información paramétrica, la resolución de problemas también es más eficiente.
9.	Probar el diseño con criterios de rendimiento ayuda a verificar que el diseño sea apropiado para las funciones requeridas, de esta forma se reduce la variabilidad y se mejora el rendimiento del producto final.

10.	Salidas automáticas de cantidades vinculadas al modelado BIM son más precisas ya que hay menos riesgo de errores humanos. Además, futuras modificaciones en el diseño también cambian las cantidades de salida por lo que se mejora el flujo y se reduce la variabilidad.
11.	BIM elimina el hecho de que los diseñadores deben mantener consistencia entre las múltiples representaciones y dibujos en 2D conforme el diseño progresa y se realizan cambios mediante el uso de una única representación de información.
12.	El uso de software capaz de integrar modelos para fusionar modelos, identificar conflictos y resolverlos a través del refinamiento iterativo de los diferentes modelos específicos de disciplina da como resultado una instalación casi libre de errores en el sitio.
13.	Identificación de errores de diseño mediante reuniones de revisiones de diseño multidisciplinarias que incluyen detección de incongruencias.
14.	La generación automática de tareas elimina errores humanos tales como omisiones de tareas o etapas de trabajo
15.	La simulación de eventos se puede utilizar para probar y mejorar los procesos de producción y para ejecutar estudios virtuales de primera ejecución que en la construcción a menudo son imposibles o poco prácticos.
17.	Se pueden preparar animaciones de producción o secuencias de instalación. Estos guían a los trabajadores sobre cómo realizar el trabajo en contextos específicos y son un medio excelente para garantizar que se sigan los procedimientos estandarizados, particularmente cuando la rotación de trabajadores de etapa en etapa es alta, como es común en la construcción
18.	Al actualizar información sobre el producto en línea se pueden identificar nuevos errores y conflictos durante ciclos cortos.
19.	La transferencia directa de instrucciones de fabricación a maquinaria controlada numéricamente, como la fabricación automatizada de acero o barras de refuerzo, elimina las oportunidades de error humano en la transcripción de información.
20.	La entrega directa de información reduce el tiempo de espera y mejora el flujo

21.	La plataforma de BIM permite una rápida visualización de datos que permite informes precisos y una respuesta rápida a flujos de trabajo
22.	Los cambios rápidos de los diversos requerimientos del proyecto, análisis de estimaciones de costos son logrados gracias a un diseño colaborativo que reduce los ciclos de tiempo para los detalles de diseño y construcción
23.	El procesamiento paralelo y coordinado de las diferentes áreas de trabajo reducen los tiempos que se requerían para los trabajos paralelos en los tradicionales trabajos de CAD
24.	Las coordinaciones entre las diversas disciplinas son automáticas y el tiempo es menor en comparación con el que se necesitaba para coordinar usando la plataforma de CAD
25.	Las tres funciones sirven para reducir el tiempo de ciclo durante la construcción, ya que dan como resultado programas operativos optimizados, con menos conflictos.
26.	Al poder visualizar los procesos constructivos en un modelado BIM, actividades que se realizan una después de otras en un mismo lugar de construcción pueden ser mejoradas y realizadas con menor tiempo. Esto reduce los ciclos de cada actividad.
27.	La maquinaria dirigida controlada por computadora alimentada directamente desde un modelo puede ayudar a acortar los tiempos de ciclo al eliminar la entrada de datos intensiva en mano de obra y / o la producción manual, lo que acorta el tiempo de ciclo para cualquier espacio o conjunto dado.
28.	Eliminación de pasos de procesamiento de datos para ordenar o renovar entregas de material, eliminación de tiempo perdido antes de ordenar, mejorar los tiempos de ciclo
29.	En este caso, la funcionalidad puede aumentar el inventario de alternativas de diseño. Esto puede considerarse beneficioso en términos de hacer selecciones más amplias, retrasando la selección de una sola alternativa hasta el último momento responsable.
30.	La visualización en línea y la gestión del proceso pueden ayudar a implementar estrategias de producción diseñadas para reducir el trabajo en inventarios de procesos y tamaños de lotes de producción (número y

	espacios en proceso por comercio específico en un momento dado) como en el enfoque KanBIM.
33.	La coordinación de diseño entre múltiples modelos de diseño utilizando un visor de modelos integrado en un entorno de trabajo colaborativo, como los descritos por Liston, permite que los equipos de diseño aporten conocimientos y habilidades multidisciplinarios en un proceso paralelo.
34.	La visualización de procesos y la comunicación en línea del estado del proceso son elementos clave para permitir que los equipos de producción prioricen sus vocaciones laborales posteriores en términos de su contribución potencial para garantizar un flujo de trabajo posterior continuo que completa espacios, implementando así el flujo Pull. Esto es fundamental para el enfoque KanBIM que extiende el sistema Last Planner.
38.	El acceso en línea a los estándares de producción, datos de productos y protocolos de la empresa ayuda a institucionalizar las prácticas de trabajo estándar al hacerlas fácilmente disponibles, y dentro del contexto, para los equipos de trabajo en la cara del trabajo. Sin embargo, esto depende de la provisión de medios prácticos para que los trabajadores accedan a información en línea.
40.	BIM proporciona un entorno de visualización ideal para el proyecto durante la etapa de diseño y construcción y permite la simulación de métodos de producción, equipos y procesos temporales. El modelado y la animación de secuencias de construcción en herramientas 4D brindan una oportunidad única para visualizar procesos de construcción, para identificar conflictos de recursos en el tiempo y el espacio y resolver problemas de construcción. Esto permite la optimización del proceso mejorando la eficiencia y la seguridad y puede ayudar a identificar cuellos de botella y mejorar el flujo
42.	Estas aplicaciones no pueden considerarse tecnología madura
43.	Donde los clientes o usuarios finales participan en revisiones simultáneas de diferentes alternativas de diseño del sistema, pueden identificar más fácilmente los conflictos entre sus requisitos y la funcionalidad que proporcionarán los sistemas propuestos.

45.	El acceso en línea ayuda a llevar la información de diseño más actualizada a la cara de trabajo (aunque no puede garantizar que la información de diseño refleje los requisitos de los usuarios)
46.	La verificación de conflictos y la resolución de otros problemas de integración verifican y validan la información del producto
47.	La visualización de los horarios propuestos y la visualización de los procesos en curso verifica y valida la información del proceso.
49.	Estas funciones pueden apoyar y facilitar la toma de decisiones participativa al proporcionar más y mejor información a todos los involucrados y al expandir la gama de opciones que se pueden considerar. Por supuesto, no pueden por sí mismos garantizar que la alta gerencia adoptará un enfoque de construcción de consenso.
56.	Compartir modelos entre todos los participantes de un equipo del Proyecto mejora la comunicación en la fase de diseño incluso sin producir dibujos, lo que ayuda a garantizar que los requisitos se entiendan y transmitan a todo el equipo y a los constructores y proveedores



ANEXO 2: Matriz de funcionalidades BIM con mayores interacciones con los principios Lean

Principios Lean / Funcionalidades BIM	Obtener calidad desde el primer momento (reducir la variabilidad del producto).	Centrarse en mejorar la variabilidad del flujo “aguas arriba” (reducir la variabilidad de la producción).	Reducir la duración de los ciclos de producción.
Visualización de forma	1,2		
Rápida generación de alternativas de diseño	1		22
Análisis predictivo del desempeño	9	9	22
estimación de costos automatizada		10	12
evaluación de conformidad con el valor del programa / cliente	1,2	1	12
Única fuente de información	11	11	
“clash checking” automático	12	12	22
generación automatizada de dibujos y documentos	11		22
edición multiusuario de un modelo de disciplina única			23

Visualización multiusuario de modelos multidisciplinarios fusionados o separados	2,13		24
generación automatizada de tareas de construcción	14		25
simulación del proceso de construcción		15	25
4D visualización de horarios de construcción	2	40	25
visualizaciones del estado del proceso		29	26
Comunicación en línea de información de productos y procesos.	18		26
fabricación controlada por computadora	19		27
integración con bases de datos del socio del proyecto (cadena de suministro)		20	28
provisión de contexto para la recopilación de datos de estado en el sitio / fuera del sitio		21	

Tabla 2: Matriz de interacción. Explicación del contenido de las celdas (2009). Adaptado de The interaction of Lean and Building Information Modelling in construction (2009).

ANEXO 3: Matriz de principios Lean con mayores interacciones con las funcionalidades BIM

Funcionalidades BIM Principios Lean	Visualización de forma	Visualización multiusuario de modelos multidisciplinares fusionados o separados	Visualización 4D de cronogramas de construcción	Comunicación en línea de información de productos y procesos.
Dar valor (reducir variabilidad en el producto)	1,2	2,13	2	18
Mejorar el flujo de procesos (reducir la variabilidad en la producción)			40	
Reducir duraciones de ciclos de producción		24	25	26
Reducir inventario			(29)	30
Reducir el tamaño de los lotes				30
Utilizar equipos multidisciplinares		33		
Utilizar el sistema Pull				34
Estandarización			17	38
Visualización de métodos de producción			40	38

Visualización de procesos de producción			40	34
Simplificación	3			
Uso de procesos paralelos			40	
Uso de tecnologías confiables				(42)
Garantizar la captura integral de requisitos	4	43		
Asegurar el flujo de requisitos	11	56		45
Verificar y validar	5	45	47	
Ve y velo por ti mismo	6			
Decidir por consenso, considerar todas las opciones	4	49	49	49