

CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN

Proyecto de Graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador, integrado por los profesores Ing. Gustavo Rojas Moya, Ing. Milton Sandoval Quirós, Ing. Ricardo Zúñiga Porras, Ing. Mauricio Araya Rodríguez, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

GUSTAVO
ADOLFO
ROJAS MOYA
(FIRMA)

Firmado digitalmente por
GUSTAVO
ADOLFO ROJAS
MOYA (FIRMA)
Fecha: 2021.03.17
04:28:42 -06'00'

Ing. Gustavo Rojas Moya.
Director

MILTON
ANTONIO
SANDOVAL
QUIROS (FIRMA)

Firmado digitalmente
por MILTON ANTONIO
SANDOVAL QUIROS
(FIRMA)
Fecha: 2021.03.15
13:49:10 -06'00'

Ing. Milton Sandoval Quirós.
Profesor Guía

Ricardo David
Zúñiga Porras

Firmado digitalmente por
Ricardo David Zúñiga Porras
Fecha: 2021.03.15 10:38:19
-06'00'

Ing. Ricardo Zúñiga Porras.
Profesor Lector

MAURICIO
ESTEBAN ARAYA
RODRIGUEZ
(FIRMA)

Firmado digitalmente
por MAURICIO
ESTEBAN ARAYA
RODRIGUEZ (FIRMA)
Fecha: 2021.03.16
21:35:26 -06'00'

Ing. Mauricio Araya Rodríguez.
Profesor Observador

**Propuesta de planificación de
los procesos constructivos de
entrepisos, columnas y muros en la
construcción de un edificio
postensado, por parte de la
empresa ROCCA Development
Group**

Abstract

In every construction project it is vital to rely on an appropriate and strategic planning since it allows to set a clear aim of what is going to be done throughout the different construction and post-construction stages.

The main objective of this graduation project is develop a proposal for the construction planning processes of the floor slabs, columns and walls of an eight-floor commercial building located in Santa Ana, which will be constructed by ROCCA Development Group Company. It should be noted that one of the main topics this project focused on was the planning of the columns, walls, and floor slabs formwork systems.

The above-mentioned planning will be developed throughout the collection of data from similar projects that have been developed by ROCCA Company, in order to be able to develop 3D, 4D and 5D models that will allow to set the most suitable deadline and estimate the cost of the development and construction of building D.

Furthermore, a new tool was created in order to control the quality of the aforementioned construction processes through the creation of flowcharts, Ishikawa diagrams, and punch lists.

Keywords: planning, quality, deadline, cost, BIM, formwork.

Resumen

En todo proyecto constructivo es imperativo el contar con una correcta planificación, ya que permite definir un norte de lo que se va a hacer en las etapas de construcción y de post construcción.

El objetivo principal de este proyecto de graduación es desarrollar una propuesta de planificación de los procesos constructivos de entrepisos, columnas y muros de un edificio comercial de 8 niveles ubicado en Santa Ana, que será construido por la empresa ROCCA Development Group. Cabe destacar que uno de los principales temas en los cuales se enfocó este proyecto fue en la planificación de los sistemas de encofrados de columnas, muros y entrepisos.

Esta planificación se desarrollará a partir de la recolección de información de proyectos similares desarrollados por la empresa ROCCA y con base en esto, generar cronogramas, modelos 3D, 4D y 5D, que permitan determinar cuál es el plazo y el costo más adecuado para el desarrollo del Edificio D.

Además, se creó una herramienta para el control de la calidad en los procesos constructivos señalados, a partir de la creación de diagramas de flujo, diagramas de Ishikawa y listas de verificación.

Palabras clave: planificación, calidad, plazo, costo, BIM, encofrados.

Propuesta de planificación de los procesos constructivos de entrepisos, columnas y muros en la construcción de un edificio postensado, por parte de la empresa ROCCA Development Group

AARON CERVANTES SOLANO

Proyecto final de graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

8 de Febrero del 2021
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Contenido

Prefacio	1
Resumen ejecutivo	2
Introducción	3
Marco Teórico	4
Metodología.....	20
Resultados	28
Análisis de	62
Resultados	62
Conclusiones	71
Apéndices.....	73
Anexos ...	¡Error! Marcador no definido.
Referencias	¡Error! Marcador no definido.

Prefacio

Los sistemas de encofrado son fundamentales dentro de la mayor parte de los proyectos constructivos, ya que con estos se logra moldear los diferentes elementos de concreto que conforman las estructuras, por ello, la elección preliminar de estos sistemas es vital para el éxito de un proyecto.

El tema a desarrollar en este trabajo final de graduación responde a la necesidad de la empresa ROCCA Development Group en la determinación del sistema de encofrado óptimo para la construcción de entresijos y columnas de un edificio de 8 niveles, lo cual a su tiempo genera el involucramiento de otros aspectos importantes, como lo son el sistema de entresijo a utilizar y el control de calidad en los diferentes procesos.

Este proyecto se realizó con el objetivo principal de realizar una propuesta de planificación de los procesos constructivos de entresijos y columnas en la construcción de un edificio con entresijos postensados, por parte de la empresa ROCCA Development Group, enfocado en la optimización, animación y control de calidad de los sistemas de encofrado que serán utilizados en la construcción del edificio.

Quiero agradecer especialmente a mis padres y hermanos que me apoyaron en todo momento durante toda mi etapa en la universidad y en general en todos los aspectos de mi vida.

A las personas e instituciones que me ayudaron en el desarrollo de este proyecto, especialmente al Ing. Marlon Navarro Pacheco de la empresa ROCCA Development Group, a mi profesor guía el Ing. Milton Sandoval y a mi profesor lector el Ing. Ricardo Zúñiga Porras.

Resumen ejecutivo

El realizar una buena planificación de los proyectos constructivos es fundamental para su ejecución, ya que permite determinar factores que puedan afectar su desempeño y su alcance.

Este proyecto de graduación se realizó en la empresa ROCCA, la cual es una empresa desarrolladora fundada a finales de los años 80 enfocada principalmente en la construcción de edificaciones.

El objetivo principal de este proyecto fue el realizar una propuesta de planificación de los procesos constructivos de entresijos postensados, columnas y muros de un edificio de 8 niveles denominado Edificio D desarrollado por la empresa ROCCA, el cual estará ubicado en Santa Ana y constará de 8 niveles de los cuales el primero será utilizado para uso comercial y los restantes 7 para oficinas. El edificio D comparte 3 niveles de parqueo con el edificio C que se encuentra a la par y que ya está totalmente construido.

Esta planificación toma mucha importancia debido a que el proyecto se centra en obtener una optimización de los procesos referentes a los sistemas de encofrado de tal forma que permita obtener una optimización en el tiempo y el costo, las cuales son variables fundamentales para medir el éxito dentro de un proyecto constructivo.

Para lograr desarrollar esta planificación de los procesos constructivos de columnas, muros y entresijos, primeramente, se dio una recolección de información referente al Edificio C, el cual es tomado como referencia por presentar muchas similitudes con respecto al Edificio D y que también fue construido por la empresa ROCCA. Además, se obtuvo información de las principales características que tendrá el edificio D y también información referente a los sistemas de encofrado de columnas, muros y entresijos. Toda esta información se obtuvo a partir de entrevistas realizadas al ingeniero Marlon Navarro de la empresa ROCCA, a los

proveedores de encofrados, así como visitas al lugar donde será construido el edificio.

Teniendo esta información se procedió a determinar con la ayuda de cuadros comparativos que contenían información de los sistemas propuestas por los proveedores y la creación de cronogramas a partir de un ciclo de actividades y distribuciones de encofrados, el sistema que se utilizó para encofrar tanto las columnas y muros, como también los entresijos del edificio. El sistema elegido para encofrar las columnas y muros fue el sistema RASTO-TAKKO y para los entresijos el sistema de mesas voladoras Topflex, ambos del proveedor Aluma Frame, y con una cantidad de 3 cuadrillas según el análisis de distribución realizado.

A partir de la elección del sistema de encofrados, se inició la etapa de diseño con el modelo 3D del edificio, donde se diseñaron todos los elementos estructurales y se generaron detalles típicos del refuerzo, generados a partir de los planos 2D. Se realizó una coordinación entre lo modelado y la información referente a tiempos y costos contenidos en el cronograma, lo que permitió generar modelos 4D y 5D que por medio de una animación, permitieron tener una perspectiva visual mucho más enriquecedora y funcional del desarrollo del Edificio D. En esta animación se muestra el costo total de los procesos seleccionados, el cual fue de \$721,823.41 y con una duración de 4.8 meses.

Por último, pero no menos importante, se procedió a crear plantillas de gestión de calidad, en las cuales se incluyeron diagramas de flujo, diagramas de Ishikawa y listas de verificación, que permitieron en conjunto determinar una línea de trabajo y de verificación para cuando se ejecute la construcción del Edificio D.

Introducción

La empresa ROCCA Development Group es una empresa desarrolladora y constructora con más de 30 años en la industria de la construcción de nuestro país, la cual se desempeña en diversos tipos de construcciones.

El proyecto de graduación fue desarrollado en la construcción de un nuevo edificio ubicado en Santa Ana San José, el cual consta con un área de 16000 m² distribuidos en 8 niveles, los cuales serán destinados al comercio.

El trabajo final de graduación tiene por finalidad el realizar una planificación de los procesos constructivos de entresijos y columnas, la cual sirva como propuesta para la construcción del nuevo edificio. Se enfatizará en la escogencia de los sistemas de encofrado para la construcción de los entresijos y columnas, los cuales resulten óptimos tanto en tiempo como en costo para el desarrollo del edificio. Además, se contemplarán los sistemas de postensado de entresijo y las mezclas de concreto a utilizar.

Objetivos

Objetivo general

Desarrollar una propuesta de planificación de los procesos constructivos de entresijos postensados, columnas y muros en la construcción de un edificio por parte de la empresa ROCCA Development Group.

Objetivos específicos

- Analizar los sistemas de encofrado para columnas y entresijos postensados utilizados en proyectos anteriores y también los 6 sistemas propuestos por la empresa para este proyecto, tomando en cuenta los tipos de formaleta, mezclas de concreto y los sistemas de postensado empleados.
- Determinar el tiempo de ejecución óptimo en la construcción de los entresijos y las columnas del proyecto, a partir de diferentes tipos de encofrados.
- Crear animaciones 3D y modelos 4D y 5D de los procesos constructivos seleccionados, a partir de la elección de la alternativa óptima para el proyecto, en relación con el tiempo y el costo.
- Definir plantillas para gestionar la calidad en los procesos constructivos de encofrados de entresijos y columnas para cumplir con los tiempos y costos establecidos.

Marco Teórico

Planificación

La dirección de proyectos se define como la aplicación de conocimientos, habilidades, herramientas y técnicas a las diversas actividades del proyecto para poder cumplir con los requisitos propuestos. Para su desarrollo, la dirección de proyectos requiere de una gestión eficiente de los procesos que la componen. A su vez, los procesos corresponden a aquel conjunto de acciones y actividades que se realizan con la finalidad de crear un producto predefinido (PMI, 2013)

La guía del PMBOK (PMI, 2013) menciona que los procesos de la dirección de proyectos se dividen en cinco categorías, que son:

- Procesos de Inicio
- Procesos de Planificación
- Procesos de Ejecución
- Procesos de Monitoreo y Control
- Procesos de Cierre

La siguiente imagen muestra de una mejor forma cuáles son estos procesos que componen la dirección de proyectos:

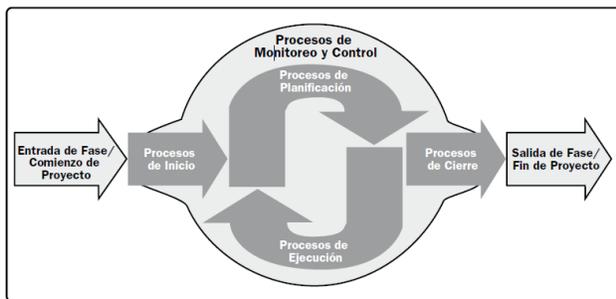


Figura 1. Grupo de procesos de la dirección de proyectos.
Fuente: PMBOK, 2013

La presente investigación se enfoca en la planificación de los procesos constructivos en la construcción de una edificación, por lo tanto, es imperativo tener una clara definición de lo que es el

proceso de planificación dentro de la dirección de proyectos.

Según el PMI (2013), la planificación se define como el grupo de procesos realizados para establecer el alcance total del esfuerzo, definir y refinar los objetivos, y desarrollar la línea de acción requerida para alcanzar dichos objetivos.

Encofrados

Los encofrados, cimbras o formaletas como también se le conocen, son los elementos que actúan como recipiente, dentro de los cuales o contra los cuales se cuela el concreto para obtener una configuración de diseño requerida. Pero los encofrados son más que solo moldes; también son estructuras temporales que soportan su propio peso, el del concreto y el de las cargas vivas que incluyen el peso de materiales, equipo y trabajadores.

Los 3 objetivos básicos que se buscan al utilizar los encofrados en la construcción son:

- **Calidad:** en términos de resistencia, rigidez, posición y dimensiones de los encofrados. Además, para ciertas edificaciones se buscan que el acabado final sea de concreto expuesto de alta calidad, lo que genera que el proceso de encofrado-desencofrado sea de mucha importancia
- **Seguridad:** tanto para los trabajadores como para las estructuras de concreto.
- **Economía:** se busca el menor costo, pero manteniendo la calidad y la seguridad requerida.

La economía es un factor determinante, ya que según Hurd (2005), el costo de los encofrados puede rondar entre un 35 y un 60 por ciento del

costo total de la estructura del concreto. Por ello, la selección del mejor sistema de encofrado, la planificación de los procedimientos de colocación y desarmado y la reutilización, son aspectos primordiales para poder acortar tiempos y costos.

El desarrollo de los encofrados ha sido paralelo al crecimiento de la construcción con concreto a lo largo del siglo XX, ya que, la utilización del concreto ha crecido hasta tal punto que podría considerarse prácticamente esencial en la mayoría de las obras constructivas. Por ello, los sistemas de encofrado han tenido que cambiar conforme pasan los años, donde cada vez se llevan a cabo proyectos más complejos, se necesita construir más rápidamente y con menos dinero, pero manteniendo estrictas normas de calidad.

Los materiales con los cuales se han fabricado los encofrados han sido múltiples, iniciando con la madera, la cual fue alguna vez predominante debido a su gran capacidad de resistir grandes presiones, facilidad de adquisición, utilización en prácticamente todos los elementos construidos con concreto y demás características que lo hicieron ser un material muy utilizado como encofrado.



Figura 2. Encofrado de madera para el colado de vigas.
Fuente: Civilexcel

Pero también la madera presenta desventajas como material encofrante, como lo son:

- Cantidad muy limitada de usos lo cual produce que se tenga que utilizar mucho material y por ende represente un mayor costo.
- Más deformable que otros materiales.

- Se requiere de muchos elementos de soporte.
- La madera tarda muchos años en crecer y poder ser utilizada como material de construcción, si su uso es excesivo puede generar una problemática ambiental muy seria.

Sin embargo, la madera todavía se utiliza como material encofrante pero en menor cantidad, esto debido a la gran cantidad de nuevos materiales que se comenzaron a utilizar y que presentaban mejores características, como lo son el acero, el aluminio, el plywood y el plástico.

Entrepisos

Los entrepisos son elementos estructurales que separan un piso de otro, cuyas dimensiones en planta son relativamente grandes en comparación con su peralte. Cumplen la función de soportar cargas normales a su plano como lo son las cargas vivas provenientes del peso de las personas, mobiliario, equipos y demás cargas que son colocadas sobre esta estructura (Cuevas,2005).

Las losas como también son conocidos los entrepisos son consideradas grandes placas planas soportadas por vigas, muros o columnas de concreto reforzado, por muros de mampostería, por vigas o columnas de acero estructural, o por el suelo (McCormac & Brown, 2011).

Existen diversos tipos de losas, las cuales se diferencian por la forma en como están apoyadas. A continuación, se indican las clasificaciones de losas y un breve resumen de cómo están conformadas y su comportamiento ante las cargas: .

Losas en una dirección

Son el tipo de losas que trabajan únicamente en la dirección perpendicular a los apoyos, los cuales pueden ser vigas principales de un marco estructural, vigas secundarias que son apoyadas a su vez en vigas principales o muros, o muros de mampostería que soportan la losa directamente (Cuevas, 2005). La figura 3 muestra cómo están conformadas las losas en una dirección:

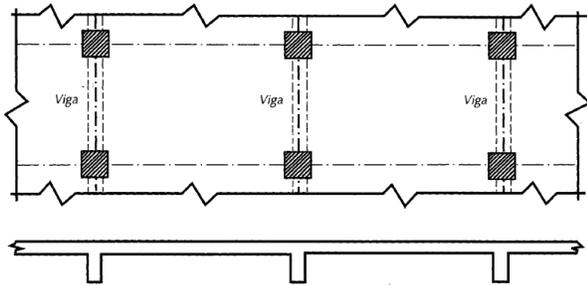


Figura 3. Losa en una dirección
Fuente: Cuevas, 2005

El comportamiento de las losas en una dirección es esencialmente como el de las vigas, donde se supone que la longitud de apoyo de la losa es una viga o también puede suponerse que la losa está formada por una serie de vigas paralelas de un metro de ancho las cuales se flexionan uniformemente (Cuevas, 2005).

Estas losas se diseñan de forma similar al de las vigas, pero teniendo ciertas consideraciones especiales. El espesor necesario de una losa en una dirección depende de la flexión, la deflexión y los requerimientos de esfuerzo cortante (McCormac & Brown, 2011).

Losas en 2 direcciones

Este tipo de losas corresponden a aquellas que son apoyadas sobre vigas de un marco estructural o muros en sus cuatro lados, generando con esto deflexiones en dos direcciones (Cuevas, 2005). La figura 4 muestra la configuración de este tipo de losas.

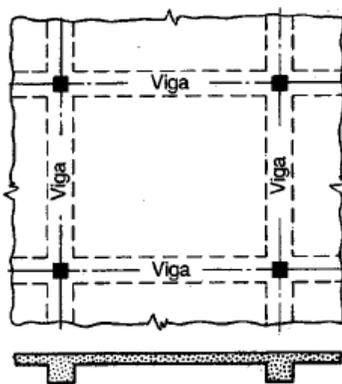


Figura 4. Losa en dos direcciones
Fuente: Nilson, 1999

El comportamiento de este tipo de losas se ve influenciado por los sistemas estructurales que la soportan, como lo son comúnmente vigas, columnas y muros, ya que las características de cada uno de estos influirán en el comportamiento de los demás. Pero si se analizan las losas como un elemento aislado, estas deben ser diseñadas tomando especial atención en las deflexiones y las flexiones generadas, ya que estas presentan una curvatura doble. Una característica estructural a tomar en cuenta en este tipo de losas, es que la rigidez a flexión de los apoyos es mucho mayor que la de la propia losa (Cuevas, 2005).

Losas planas

Son aquellas losas cuyo medio de apoyo es directamente sobre las columnas, sin la intervención de vigas. Estas pueden poseer ampliaciones en las columnas o en losas, o ser de peralte uniforme las cuales son denominadas placas planas. Pueden ser macizas o aligeradas, y en este último caso el aligeramiento se logra al incorporar bloques huecos o tubos de cartón (Cuevas, 2005).

Las denominadas placas planas como se mencionó anteriormente son losas sólidas de concreto con un espesor uniforme, en las cuales las cargas son transferidas directamente a las columnas. Estas tienen la ventaja de construirse rápidamente, debido a la simplicidad de los encofrados y del armado del acero de refuerzo (McCormac & Brown, 2011).

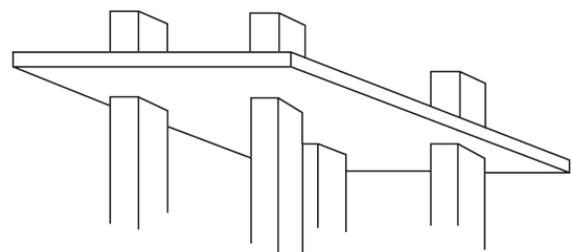


Figura 5. Losa plana de peralte uniforme (placas planas)
Fuente: McCormac & Brown, 2011

Las ampliaciones que se le aplican a las columnas en las secciones superiores se les llama capiteles, las cuales tienen la función de aumentar la sección crítica que resistirá el cortante por penetración, el cual es el factor que rige en muchas ocasiones el diseño de este tipo de losas (Cuevas,

2005). Este tipo de configuración genera losas con desempeños muy satisfactorios para cargas pesadas y grandes claros, además de requerir menos cantidades de concreto y refuerzo. (McCormac & Brown, 2011)

También a este tipo de losas se les colocan elementos denominados ábacos, los cuales son colocados en la zona de la losa que está alrededor de las columnas. Estos elementos tienen la función de aumentar el espesor de la losa en las zonas donde hay mayor momento flexionante y donde se presenta el cortante crítico por penetración (Cuevas, 2005).

La figura 6 muestra una configuración de losa plana en la cual se utilizan tanto los capiteles como los ábacos. Es importante recalcar que tanto los capiteles como los ábacos pueden ser utilizados individualmente en una losa plana, no necesariamente tienen que estar juntos.

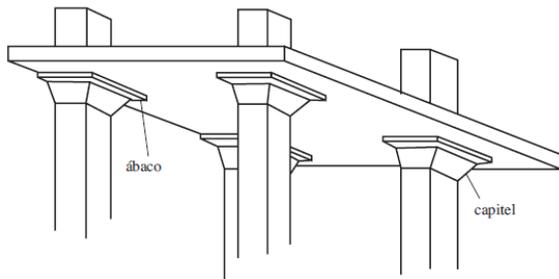


Figura 6. Losa plana con capiteles y ábacos
Fuente: McCormac & Brown, 2011

El comportamiento de las losas planas se ve afectado por las fallas tanto en cortante por penetración o por flexión. La primera falla como se ha mencionado anteriormente consiste en la penetración de la columna dentro de la losa, provocando con esto un cono o pirámide truncada. Es común que este tipo de falla sea el factor crítico en el diseño de las losas planas, especialmente cuando no se utilizan los capiteles y/o ábacos, mencionados anteriormente (Cuevas, 2005).

El tipo de falla por flexión ocurre generalmente luego de que las losas experimentan deformaciones considerables y de que el acero de refuerzo fluye en varias zonas, ya que estas estructuras son subreforzadas (Cuevas, 2005).

Ya teniendo una definición más clara de lo que son los entrepisos y los tipos de sistemas más empleados, es necesario conocer cuáles son los métodos de reforzamiento más utilizados en las losas para contrarrestar los efectos que producen las cargas propias y las impuestas en estas estructuras.

Los entrepisos son elementos que sufren principalmente de flexión, debido a su configuración y como son colocadas las cargas, como vemos en la figura 7.

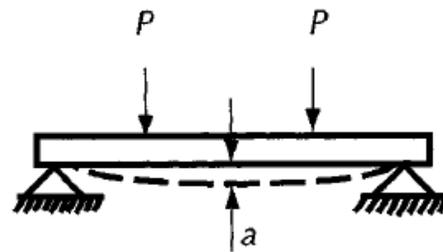


Figura 7. Ejemplo de flexión en losas
Fuente: Cuevas, 2005

Al estar deflectadas, las losas en su parte superior presentan compresión y en la parte inferior tensión. Al ser elementos de concreto los que se están analizando y teniendo en cuenta que las estructuras construidas con este material son fuertes a la compresión, pero débiles a la tensión, el utilizar acero de refuerzo es imperativo para poder controlar esa debilidad a la tensión; esta combinación genera los elementos de concreto reforzado que tanto conocemos. Pero debido a que cada vez se necesitaban estructuras más eficientes, con un menor costo, más seguras, estéticas y que representen un tiempo de construcción menor, desde hace muchos años se comenzó a utilizar en las losas otro tipo de sistema de reforzamiento en el concreto, el presfuerzo (Montaño, 2008).

Según McCormac & Brown (2011), el presfuerzo se define como la imposición de esfuerzos internos en una estructura, los cuales son de carácter opuesto a los causados por las cargas de servicio o de trabajo, generando con esto un momento negativo como se ilustra en la figura 8.

Presfuerzo en entrepisos

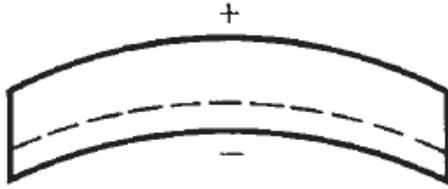


Figura 8. Momento negativo producto del presfuerzo
Fuente: Cuevas, 2005

Estos esfuerzos son de tal magnitud y dirección que los esfuerzos resultantes de las cargas externas dadas se equilibran hasta un grado deseado. En las estructuras de concreto reforzado, el presfuerzo se introduce dando tensión al refuerzo de acero (Montaño, 2008).

El presfuerzo presenta ventajas y desventajas al ser utilizado en elementos de concreto, las cuales se muestran en el siguiente cuadro:

Cuadro 1. Ventajas y desventajas del presfuerzo

Ventajas	Desventajas
Permite utilizar las secciones transversales enteras de los miembros para resistir cargas, lo que genera elementos mas pequeños y por consiguiente un menor peso y también una menor altura entre pisos.	Se requiere de un control de calidad más estricto.
Los elementos presfuerzados no se agrietan bajo cargas de trabajo, por ello tienen un mejor aspecto, son más impermeables, requieren menor mantenimiento y duran mas que los elementos de concreto reforzado.	A la hora de aplicar las fuerzas de compresión al concreto debido al presfuerzo. Aunque se considera dentro del diseño estructural, a la hora de aplicar las fuerzas de compresión al concreto debido al presfuerzo, se presenta un cierto acortamiento que relaja parcialmente los cables, lo que da como resultado una cierta reducción en la tensión de los cables.

En los elementos de concreto presfuerzado se obtienen deflexiones totales menores, debido a los momentos negativos generados.

Se deben de revisar condiciones adicionales de esfuerzo en el diseño, como los que se presentan cuando se aplican por primera vez las fuerzas iniciales de presfuerzo.

Se da una reducción de los esfuerzos de tensión diagonal.

El costo de los dispositivos de anclaje terminales y de las placas de extremo de viga que se requieren.

Mayor resistencia a la fatiga y al impacto, comparado con las estructuras de concreto reforzado.

Existen 2 métodos generales para presforzar los elementos de concreto, los cuales son el pretensado y el postensado. En ambos casos el efecto que se produce es el mismo y fue el señalado anteriormente, lo que cambia es la forma en como es aplicada la fuerza de tensión en los cables. Además, en términos de organización en la construcción, los elementos pretensados al ser creados en planta y generalmente de magnitudes importantes, requieren una mayor coordinación para su transporte y su colocación en sitio, lo que genera un costo mayor y tiempos de ejecución que pueden ser comprometidos. Por otro lado, los elementos postensados al ser creados en sitio, permiten que todos los materiales sean transportados de una forma más fácil, disminuyendo los costos; además los tiempos de utilización de la grúa para el proceso de izaje se reducen considerablemente en comparación. Se le dará mayor importancia al postensado, debido a que es el método utilizado en la construcción de entresijos del edificio analizado en este proyecto.

Pretensado

Este tipo de presfuerzo consiste en la tensión de los cables o tendones, antes de colar el concreto. Luego de que el concreto alcanzo una resistencia suficiente, se cortan estos tendones y la fuerza de presfuerzo se transmite al concreto por adherencia. (McCormac & Brown, 2011)

Postensado

En el caso del método de postensado, los tendones se tensan después de colar el concreto, cuando este ya ha alcanzado la resistencia requerida.

Este proceso inicia con la colocación de tubos o conductos de metal o plástico, en los cuales se colocan los tendones sin presforzar y luego se cuela el concreto.



Figura 9. Conductos con los tendones sin presforzar
Fuente: Mundo Avenida, 2017

Cuando el concreto haya adquirido una resistencia suficiente, estos tendones se tensan con la ayuda de torones y luego se unen mecánicamente a dispositivos de anclaje en los extremos de la losa para mantener su condición estirada.



Figura 10. Anclaje en losa postensada
Fuente: CCL, 2016

En las losas postensadas los tendones pueden transmitir los esfuerzos al concreto de 2 formas:

- Sistema de tendones adheridos:

Presentan la característica de formar un enlace continuo a lo largo de su longitud con el concreto a su alrededor. Esto se consigue al colocar en la losa conductos en los cuales se colocan los tendones y luego se inyecta una lechada entre estos, como se puede ver en la figura 11. (Hymans, 2013)

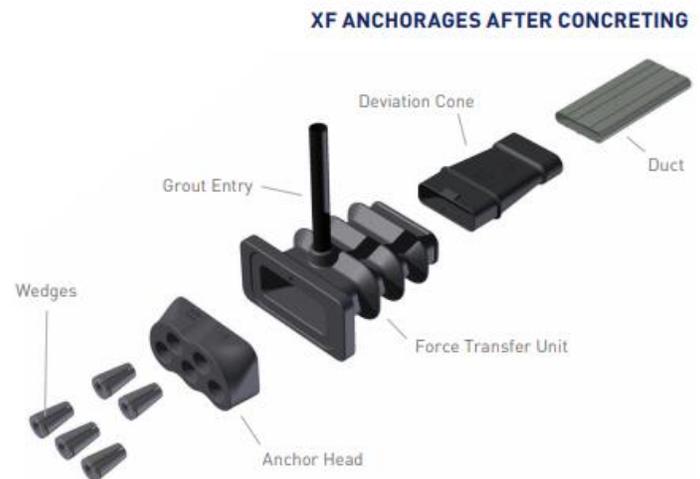


Figura 11. Estructura del sistema XF de tendones adheridos
Fuente: CCL, 2016

Según Hymans (2013), la lechada cumple las siguientes funciones:

- Proporcionar un enlace continuo entre el tendón y el conducto.
- Aumentar la protección contra la corrosión al actuar como barrera física contra la penetración de la humedad.
- A través de su alcalinidad, proporcionar un ambiente no conductor para la corrosión.

Según Hymans (2013), los conductos cumplen las siguientes funciones:

- Mantener un camino vacío para los filamentos en el miembro de concreto durante la construcción.
- Transferir la unión entre la lechada dentro del conducto y el concreto que lo rodea.
- Actuar como protección adicional contra la penetración de humedad y productos químicos.

- Sistema de tendones no adheridos:

Corresponden a los tendones que no están unidos al concreto. Esto se logra al estar recubiertos con una capa inhibidora de la corrosión conocida como grasa y envueltos en un revestimiento de plástico, como se puede ver en la figura 12. (Hymans, 2013)



Figura 12. Estructura del sistema XU de tendones no adheridos
Fuente: CCL, 2016

Según Hymans (2013), el plástico cumple las siguientes funciones:

- Actuar como un rompedor de adherencia.
- Proporcionar protección contra posibles daños por manipulación mecánica.
- Formar una barrera contra el ingreso de humedad.

Según Hymans (2013), la grasa cumple las siguientes funciones:

- Reducir la fricción entre el hilo y el revestimiento de plástico.
- Proporciona protección adicional contra la corrosión.

Ambos sistemas presentan ventajas y desventajas, que motivan su utilización en la construcción de una losa postensada. Tales características se presentan en el siguiente cuadro:

Cuadro 2. Ventajas y desventajas de los sistemas adheridos y no adheridos

Sistemas	Ventajas	Desventajas
Adheridos	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema más seguro contra daños accidentales. • Gran cantidad de hilos son anclados en conjunto, generando un ahorro el número de anclajes. • Una sección de concreto con tendones adheridos posee una mayor resistencia local final que una con tendones no adheridos. • Si un tendón adherido se daña en un piso continuo, la pérdida se limita al tramo en particular donde ocurrió el daño. • Mayor protección contra incendios por el concreto adicional colocado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Costo adicional por los conductos y la lechada. • Se necesita equipo extra referente a los conductos metálicos y plásticos, con el consecuente requisito adicional de manipulación y almacenamiento en sitio. • El proceso de colocación es más complicado que en los tendones no adheridos, por la lechada y por lo conductos que se deben de colocar.
No adheridos	<ul style="list-style-type: none"> • Al no ser adheridos son más fáciles de insertar en el concreto que los adheridos. • En caso de daño a un tendón en un piso terminado, para tramos cortos es posible retirar el tendón no adherido e insertar otro. Este reemplazo no es posible si ya la lechada fue inyectada en el tendón adherido. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor dificultad para realizar una rehabilitación de una losa, ya que si un filamento no unido se daña en un piso continuo, entonces toda la serie de los tramos asociados sufren de la pérdida. • Mayor peligro contra daños accidentales debido a la ausencia de ducto metálico, lo que genera que sea más factible que el revestimiento se dañe. • Los tendones no adheridos pueden deslizarse con respecto al concreto, generando con esto una disminución en la tensión. • Si un tendón no adherido se daña en un piso continuo, toda la serie de tramos asociados sufren de la pérdida.

Fuente: Elaboración propia a partir de Hymans (2013)

BIM

¿Qué es BIM?

Según Building Smart Spain (2020), el Building Information Modeling o Modelado de la Información en la Construcción de ahora en adelante llamado BIM, corresponde a una metodología de trabajo colaborativa para la creación y gestión de los proyectos de construcción, la cual tiene por objetivo el poder centralizar o unir toda la información de los proyectos constructivos en un único modelo de información digital creado por todos los agentes involucrados.

Importancia

El utilizar BIM en un proyecto constructivo permite obtener una serie de ventajas con respecto a la construcción habitual, es por ello que es importante puntualizar cuales son los beneficios que se obtienen al implementar esta metodología a partir de datos de IAC (2020) y Autodesk (2020):

- Logra involucrar en un solo modelo a todas las áreas participantes dentro de un proyecto de construcción, de modo que todos estén alineados con las necesidades del proyecto y con las actividades por desarrollar, lo que se conoce como interoperabilidad y se puede ver en la figura 13.
- Puede ser empleado en todas las etapas del ciclo de vida de un proyecto: Planeamiento, Diseño, Construcción y Operación.

- Evita la pérdida de la información en el desarrollo del proyecto.
- Logra reducir los tiempos de comunicación entre las áreas involucradas.
- Se logra cumplir con los tiempos de entrega y con esto generar más ganancias.
- Ejecuta trabajo colaborativo disminuyendo reprocesos.
- Permite explorar opciones de diseño y crear visualizaciones que ayudan a todas las partes interesadas, a comprender como se verá el proyecto constructivo antes de su construcción.

Uso del BIM a nivel mundial

Al dar tan buenos resultados, la metodología BIM es utilizada en muchos países como por ejemplo Suecia o Noruega donde su uso es obligatorio en proyectos públicos. En el caso de nuestro país el uso de BIM se considera todavía incipiente, pero actualmente muchas organizaciones gubernamentales y privadas han hecho esfuerzos para que en un futuro cercano se pueda implementar esta metodología en más proyectos constructivos. (Building Smart Spain, 2020)

Además, la metodología BIM está basada en el uso de estándares abiertos como el IFC, el cual es un formato de datos que tiene la finalidad o propósito de permitir el intercambio de modelos de información entre los agentes del proyecto sin la pérdida de datos (geometría, materiales, estructuras, instalaciones, costos, etc), y que además está definida por la norma de calidad ISO 16739:2013. (Building Smart Spain, 2020)

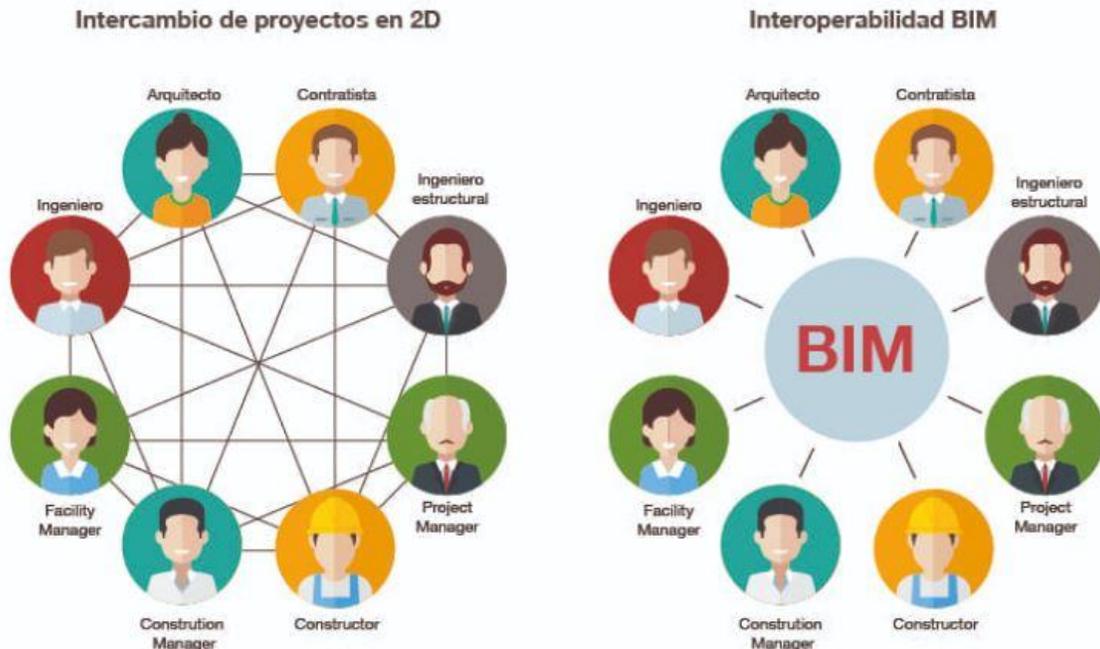


Figura 13. Interoperabilidad del BIM
Fuente: Biblus, 2019

Dimensiones BIM

Como se mencionó anteriormente, la metodología BIM busca el involucrar a todos los actores presentes en los proyectos constructivos. Esto lo logra al desarrollar una convergencia de todas las dimensiones de una edificación, las cuales según la metodología BIM son 7 y se pueden visualizar en la figura 14. (Structuralia, 2020)

- 1ª Dimensión (1D): corresponde a la idea inicial del proyecto, donde se determina la localización y las condiciones iniciales del proyecto tales como geometría, terreno, etc.
- 2ª Dimensión (2D): al tener la idea se elabora un boceto, en el cual se determinan las características genéricas del proyecto, tales como planos, programación, cargas estructurales, definición de materiales, etc.
- 3ª Dimensión (3D): al tener ya la información respectiva de las 2 dimensiones anteriores, se procede al modelado geométrico de la estructura del

proyecto en 3D, mediante el uso de softwares especializados para esta tarea.

- 4ª Dimensión (4D): corresponde a la dimensión temporal, donde se enlaza el modelado 3D del proyecto con la programación de la obra, lo cual nos permite ver como avanzan las obras con respecto al tiempo
- 5ª Dimensión (5D): corresponde a la incorporación de costos al modelado 3D, lo que nos permite generar informes presupuestarios durante cualquier momento de vida del proyecto.
- 6ª Dimensión (6D): corresponde a la dimensión donde se realiza un análisis de la sostenibilidad energética del proyecto.
- 7ª Dimensión (7D): la última dimensión dentro de la metodología BIM corresponde a la gestión y mantenimiento del proyecto una vez que este entre en operación, con la finalidad de mantener la calidad.

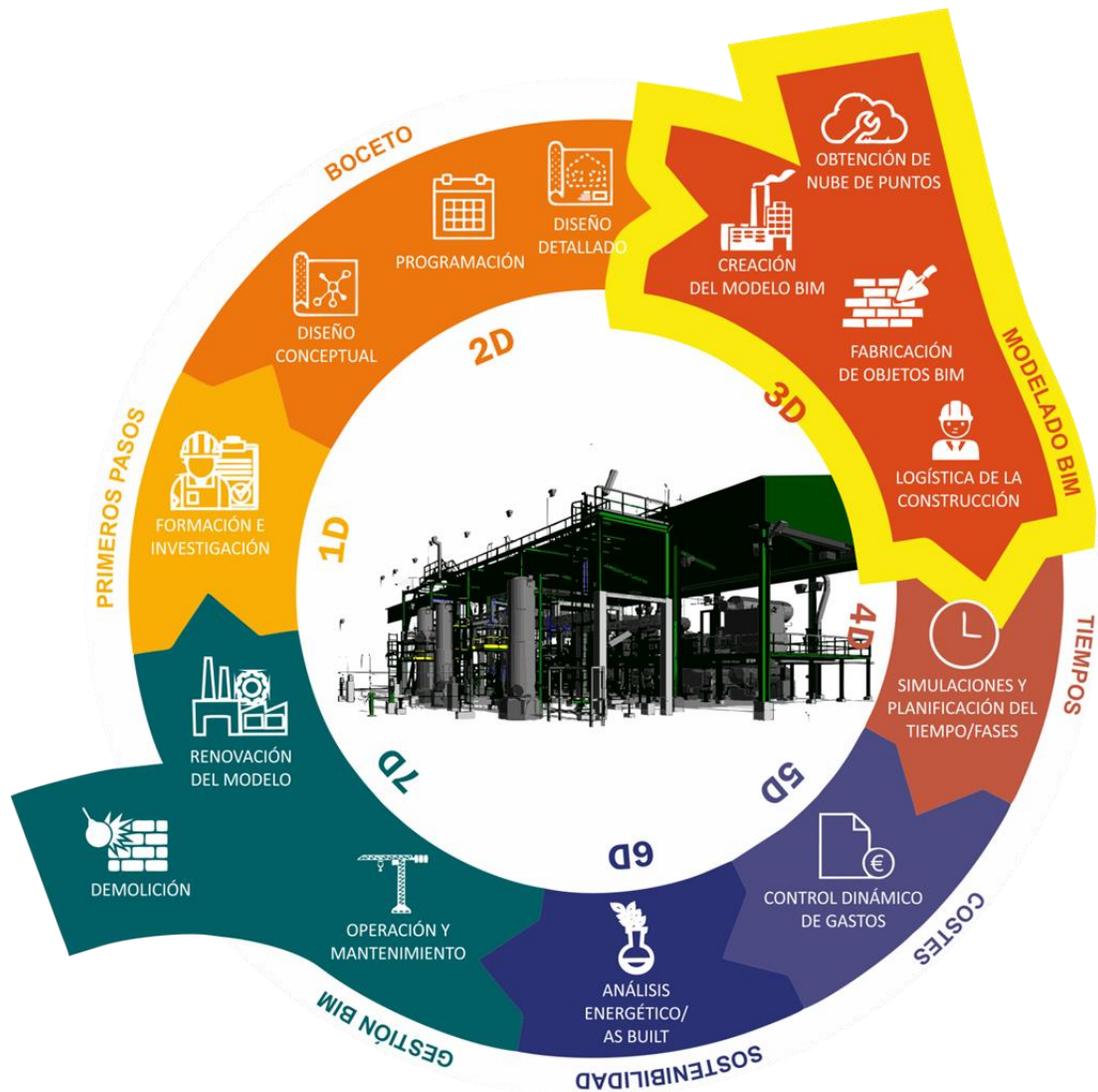


Figura 14. Interoperabilidad del BIM
Fuente: Civilju, s.f

Programación de obra

Según la guía del PMBOK (2017), un modelo de programación corresponde a una representación del plan para ejecutar las diferentes actividades del proyecto que involucran la duración, dependencias entre actividades y demás información de planificación que se utiliza junto con otros objetos de programación, para poder crear los cronogramas del proyecto.

Un cronograma corresponde a una forma de representar el programa de actividades de un proyecto, el cual facilita la realización y el control del avance al utilizar como elementos básicos las actividades y los tiempos de realización. (Rodríguez, 2005)

Para poder obtener el cronograma de un proyecto, es fundamental el seguir una serie de procesos para poder tener una correcta gestión del proyecto. La guía del PMBOK (2017) describe 7 procesos que nos permitirán poder llevar a cabo el desarrollo y control de los cronogramas.

Planificar la Gestión del Cronograma

Corresponde al primer proceso y consiste en establecer las políticas, procedimientos y la documentación necesaria para planificar, desarrollar, gestionar, ejecutar y controlar el cronograma del proyecto. Proporciona una guía y dirección sobre como se gestionará el cronograma del proyecto. (PMBOK, 2017)

Dentro de este proceso, es importante destacar la línea base del alcance del proyecto, ya que en ella aparte de incluirse los detalles del enunciado del alcance del proyecto, también se incluyen detalles de la estructura de desglose del trabajo (EDT o WBS en inglés). (PMBOK, 2017)

La EDT corresponde a una descomposición jerárquica del alcance total del trabajo para poder cumplir con los objetivos planteados en el proyecto y crear los entregables requeridos. Cada subnivel de la EDT representa una definición cada vez más detallada del trabajo del proyecto. Dentro de la EDT para cada actividad o trabajo del proyecto, se le asigna un identificador único, los cuales proporcionan una estructura para la consolidación jerárquica de los costos, del cronograma y de la información de los recursos. (PMBOK, 2017) Una sencilla representación de lo que es la EDT se muestra en la figura 15.

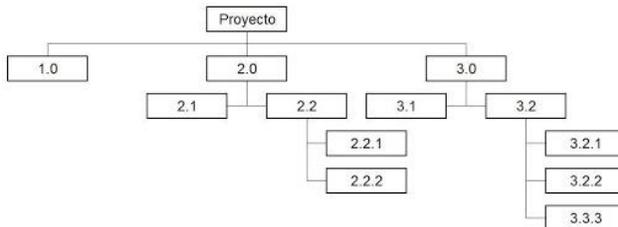


Figura 15. Representación esquemática de la EDT
Fuente: Recursos en Project Management, s.f

Definir las Actividades

Proceso en el cual se identifican y documentan las acciones específicas que se deben de realizar para crear los entregables del proyecto. El punto clave de este proceso corresponde al desglose de los paquetes de trabajo en actividades que permitan obtener una base para la estimación, programación, ejecución, monitoreo y control del trabajo del proyecto. En el anterior proceso se mostraban detalles de la EDT para tener una visión

más clara del alcance del proyecto, para este proceso la EDT junto con los entregables, las restricciones y los supuestos del proyecto, se deben de tener en cuenta de manera explícita. (PMBOK, 2013)

Secuenciar las Actividades

Consiste en el proceso de identificar y documentar las relaciones entre las actividades del proyecto, teniendo con esto una definición de la secuencia lógica del trabajo para lograr obtener una máxima eficiencia teniendo en cuenta las restricciones de las actividades del proyecto. (PMBOK, 2013)

Para poder relacionar las actividades del proyecto, se utiliza el método de diagramación de precedencias (PDM siglas en inglés). La PDM es una técnica en la cual las actividades se representan mediante nodos y se vinculan mediante una o más relaciones lógicas que indican la secuencia en que deben de ser ejecutadas. (PMBOK, 2013) Este método incluye cuatro tipos de dependencias entre actividades las cuales se muestran en la figura 16, y son:

- Final a Inicio: dependencia en la cual la actividad sucesora no puede iniciar hasta que la actividad predecesora haya concluido.
- Final a Final: en esta dependencia la actividad sucesora no puede finalizar hasta que la actividad predecesora también haya finalizado.
- Inicio a Inicio: dependencia en la cual la actividad sucesora no puede iniciar hasta que la actividad predecesora haya iniciado.
- Inicio a Final: relación lógica en la cual la actividad sucesora no puede finalizar hasta que la actividad predecesora haya comenzado.

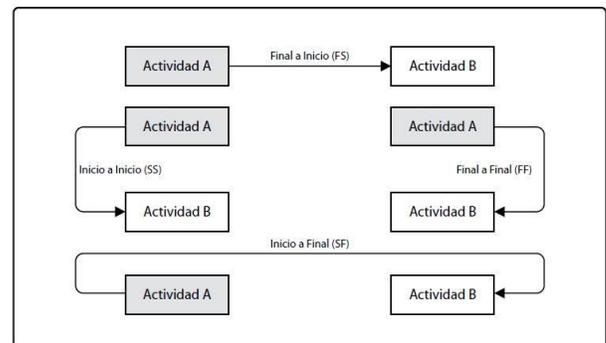


Figura 16. Precedencias entre actividades
Fuente: PMBOK, 2013

Estimar los Recursos de las Actividades

Proceso en el cual se estiman el tipo y la cantidad de materiales, personas, equipos o suministros requeridos para llevar a cabo las actividades. Además, se identifican las características de estos recursos necesarios para completar las actividades, lo cual permite estimar el costo y la duración de una mejor forma. (PMBOK, 2013)

Uno de los aspectos más relevantes que se identifica dentro de este proceso, corresponde al calendario de recursos. Este tipo de calendario corresponde a la identificación de los días y turnos de trabajo en que cada recurso específico está disponible, lo cual se utiliza para estimar la utilización de los recursos. (PMBOK, 2013)

Estimar la Duración de las Actividades

En este proceso se establece la cantidad de tiempo necesario para concluir cada una de las actividades, lo que constituye una entrada fundamental para desarrollar el cronograma del proyecto. Conlleva el utilizar información sobre el alcance del trabajo de las actividades, así como los recursos necesarios, las cantidades estimadas y los calendarios de utilización. Para poder estimar la duración de las actividades, las entradas provienen de las personas o grupo de trabajo que este más familiarizado o que tenga la suficiente experiencia en su desarrollo. Esta estimación se va dando de manera progresiva, donde se tiene en cuenta la calidad y la disponibilidad de esos datos de entrada. (PMBOK, 2013)

Desarrollar el Cronograma

Corresponde al proceso en el cual se integran todos los procesos anteriores para crear el modelo de programación del proyecto con fechas planificadas que van a permitir completar las actividades del proyecto. Cabe resaltar, que el desarrollar un cronograma es un proceso iterativo, donde se revisan y repasan las estimaciones de duración y de los recursos, con la finalidad de obtener un cronograma realista, que represente

correctamente como se van a desarrollar las actividades del proyecto. (PMBOK, 2013)

Una de las herramientas más utilizadas en el desarrollo de un cronograma, corresponde al método de la ruta crítica. Este método consiste en la estimación de la duración mínima del proyecto, al generar una secuencia de actividades que represente el camino más largo a través del proyecto. En el se toman en cuenta las fechas de inicio y finalización, tempranas y tardías, de todas las actividades, y con esto realiza un recorrido hacia adelante y hacia atrás de la red del cronograma, determinando cual es la duración mínima del proyecto. (PMBOK, 2013)

Los cronogramas se pueden representar de diferentes maneras, como por ejemplo en tablas o gráficos. Una de las representaciones más utilizadas es la representación gráfica con diagramas de barras o diagramas de Gantt. Este tipo de diagramas presentan el cronograma con la lista de actividades en el eje vertical, las fechas en el eje horizontal y las duraciones en forma de barras posicionadas en función de las fechas de inicio y de finalización de cada actividad. Además, en estos cronogramas se incluyen el formato estructura de la EDT, con lo cual permite la identificación de las actividades según el código asignado. (PMBOK, 2013) La figura 17 muestra un ejemplo del diagrama de Gantt.

Controlar el Cronograma

Este último proceso consiste en el monitoreo del estado de las actividades del proyecto, con la finalidad de actualizar el avance y gestionar los cambios producidos por las desviaciones realizadas con respecto al plan original. (PMBOK, 2013)

Para poder determinar esas desviaciones, es necesario realizar revisiones de desempeño, las cuales permiten medir, comparar y analizar el desempeño del cronograma. Existen diversas técnicas para poder medir este desempeño, entre las cuales se encuentran el análisis de tendencias, comparación del avance a lo largo de la ruta crítica, gestión del valor ganado, entre otras. (PMBOK, 2013)

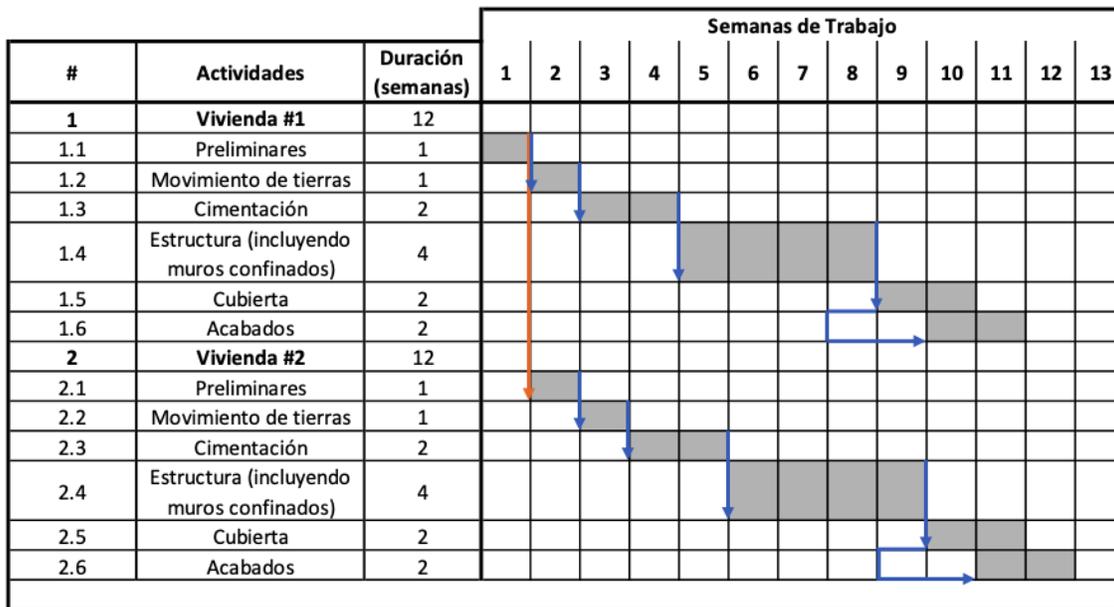


Figura 17. Ejemplo de un Diagrama de Gantt
Fuente: acaddemia, 2018

Gestión de Calidad

En todas las áreas de trabajo siempre se busca el poder realizar las diferentes actividades o tareas de la mejor forma, y esto se logra aplicando medidas de calidad que ayuden a que el producto final cumpla con las necesidades o propósitos planteados. Pero antes de poder aplicar metodologías o sistemas que permitan llegar a este fin, es necesario comprender qué se entiende por calidad.

Según el PMBOK (2013), la calidad se define como el grado en que un conjunto de características inherentes cumple con los requisitos. Pero para poder lograr el que se cumplan estos requisitos, es necesario poder gestionar de una forma correcta la calidad del proyecto.

La Gestión de la Calidad se refiere a los procesos y actividades de la organización que está ejecutando el proyecto, que permiten establecer las políticas de calidad, objetivos y las responsabilidades para que el proyecto pueda satisfacer las necesidades para las cuales fue desarrollado. (PMBOK, 2013)

El PMBOK (2017), menciona que la gestión de la calidad es desarrollada mediante 3 procesos, los cuales son:

- Planificar la Gestión de la Calidad: Corresponde a la identificación de los requisitos de calidad para el proyecto, sus entregables y documentar cómo demostrará el proyecto que va a cumplir con los mismos.
- Realizar el Aseguramiento de la Calidad: Consiste en revisar los requisitos de calidad y los resultados obtenidos de los controles de calidad, para poder asegurar que se están utilizando las normas de calidad adecuadas.
- Controlar la Calidad: Se refiere al monitoreo y registro de los resultados obtenidos de la ejecución de las actividades del control de calidad, con la finalidad de calificar el desempeño y recomendar cambios.

El proyecto de graduación se enfoca en el primer proceso, ya que se busca obtener una planificación de las actividades en la construcción de entrepisos, columnas y muros.

La planificación de la gestión de la calidad busca proporcionar una guía y dirección de cómo se va a gestionar la calidad durante todo el proyecto. Para obtener esta planificación, es necesario definir los parámetros necesarios para aplicar las herramientas que permitan obtener una salida o producto (PMBOK, 2017). La siguiente imagen muestra los 3 procesos necesarios para planificar la gestión de la calidad:



Figura 18. Entradas, herramientas y salidas para la planificación de la gestión de la calidad
Fuente: PMBOK, 2013

Como se puede observar, son muchos los procesos que se llevan a cabo para planificar de una forma correcta la gestión de la calidad en los proyectos. Este proyecto de graduación se enfocará en la definición de los parámetros o entradas para poder hacer uso de 3 de las 7 herramientas básicas de calidad para poder obtener listas de verificación o control de la calidad.

Siete Herramientas Básicas de Calidad

Corresponden a herramientas utilizadas para resolver problemas relacionados con la calidad. La figura 19 muestra cuales son estas siete herramientas:

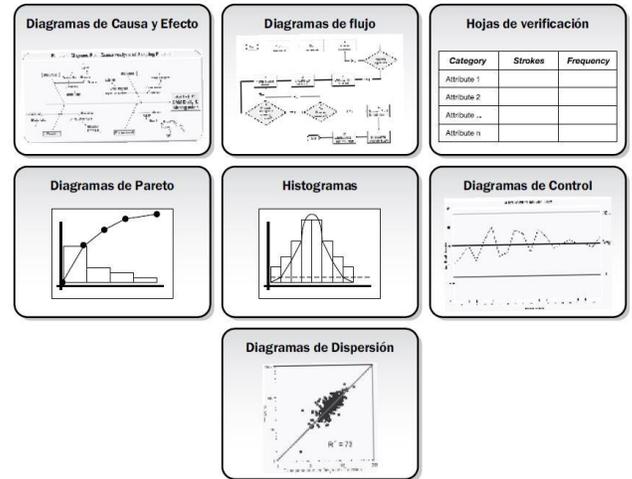


Figura 19. Siete herramientas de calidad representadas con un ejemplo gráfico
Fuente: PMBOK, 2013

Para el proyecto se utilizarán 3 de estas herramientas, las cuales corresponden a los diagramas de causa efecto, diagramas de flujo y hojas de verificación.

- Diagramas de causa efecto: conocidos como diagramas de Ishikawa o de espina de pescado, corresponden a los diagramas en los cuales un problema conocido se coloca en la cabeza de la espina del pescado y este sirve como punto de partida para trazar el origen del problema hacia su causa. (PMBOK,2013) Las causas son colocadas en la parte final de las espinas del pescado y sobre ellas se colocan las subcausas.

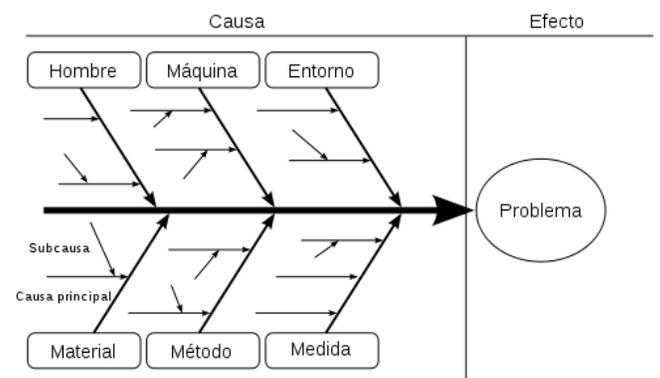


Figura 20. Partes del diagrama de causa efecto
Fuente: progressalean, 2014

- Diagramas de flujo: según el PMBOK (2013) corresponden a los diagramas que muestran la secuencia de pasos y las posibilidades de ramificaciones que existen en un proceso que transforma una o más entradas en una o más salidas.

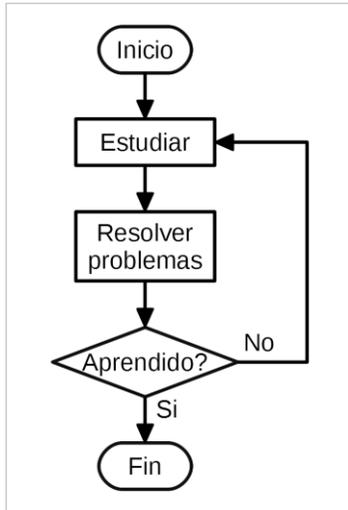


Figura 21. Ejemplo sencillo de un diagrama de flujo
Fuente: Picuino, 2020

- Hojas de verificación: conocidas como hojas de control de calidad, se utilizan para recoger datos de los atributos mientras se realizan inspecciones para identificar defectos.

¿SU ORGANIZACIÓN/EQUIPO HA:	NO EFECTUADO	EN PROGRESO	EFECTUADO
1. Determinado el propósito de los datos que están tratando de reunir?			
2. Definido el tipo de datos que son necesarios?			
3. Identificado dónde se deben reunir los datos?			
4. Identificado de quién deben obtenerse los datos?			
5. Investigado si los datos están disponibles?			
6. Determinado los métodos/herramientas que se utilizarán para reunir los datos?			
7. Determinado que tantos datos quiere reunir?			
8. Decidido quién reunirá los datos?			
9. Determinado cuándo los datos serán reunidos (periodo de tiempo de estudio)?			
10. Decidido cómo se van a analizar los datos?			

Figura 22 Ejemplo de una hoja de verificación
Fuente: SlideShare, 2012

Metodología

La práctica profesional dirigida se realizó en la empresa desarrolladora y constructora ROCCA Development Group, enfocada en la planificación de los procesos constructivos de entrepisos, columnas y muros para la construcción de un edificio de 8 niveles denominado edificio D. La siguiente figura muestra mediante un diagrama la metodología a seguir para cada uno de los objetivos planteados:

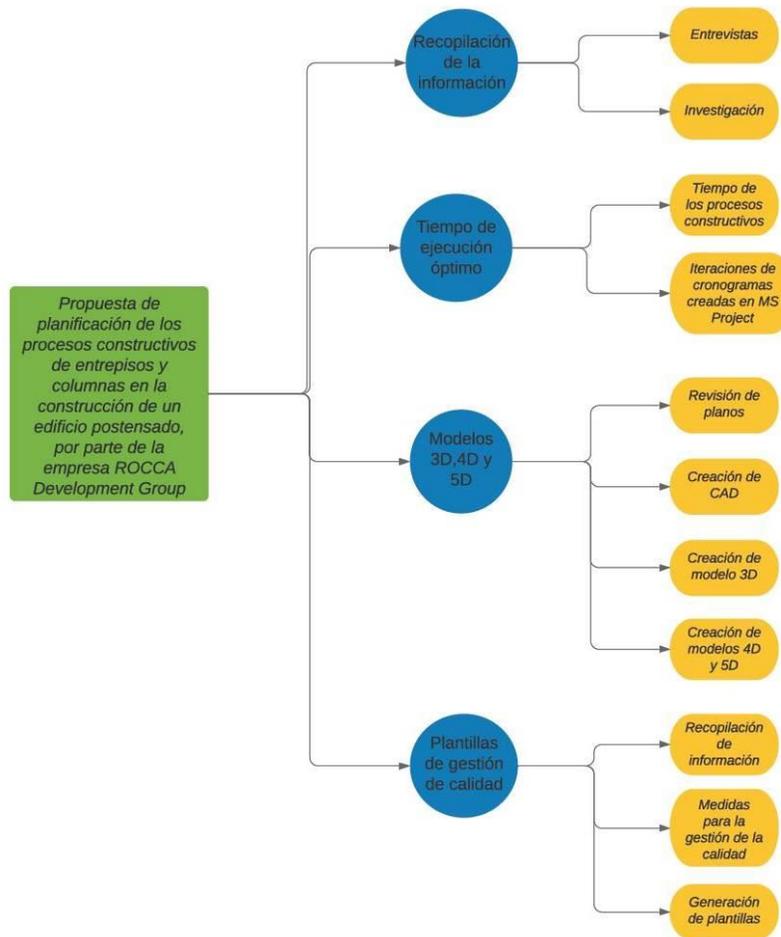


Figura 23. Diagrama de la metodología del proyecto
Fuente: Elaboración propia

Análisis de los sistemas de encofrado

Para el cumplimiento del primer objetivo, se realizaron entrevistas al ingeniero Marlon Navarro de la empresa ROCCA Development Group y a los proveedores de sistemas de encofrados. Estas entrevistas se presentan en la sección de apéndices.

La primera entrevista fue realizada al ingeniero Marlon Navarro, la cual buscaba obtener información referente a la construcción de un proyecto denominado edificio C por parte de la empresa ROCCA el cual presenta muchas similitudes con respecto al edificio D que se mencionará posteriormente, y con esto tener un buen parámetro de comparación entre ambos proyectos. En esta entrevista se buscó obtener información referente a los sistemas de encofrados utilizados, las actividades necesarias para la construcción de los elementos estructurales, características del edificio (niveles, área, costos), materiales de construcción utilizados, entre otros aspectos.

La segunda entrevista se realizó con el propósito de recolectar información con respecto al edificio D, que es el proyecto con respecto al cual se desarrolla esta práctica profesional. En la entrevista se buscó obtener información sobre la cantidad de niveles del edificio, área de estos niveles y los tipos de elementos estructurales a construir. Además, se hizo la solicitud a la empresa de facilitar los planos estructurales.

La tercera entrevista fue aplicada a los proveedores de encofrados, con el objetivo de obtener información referente a los sistemas cotizados por la empresa, tal como sus características, materiales de construcción, armado y desarmado del equipo, disponibilidad y precio de alquiler.

Determinación del tiempo de ejecución óptimo para la construcción de entrepisos y columnas

Con respecto al segundo objetivo, el ingeniero de la empresa ROCCA Marlon Navarro, proporcionó una lista de actividades y tiempos que fueron requeridos para la construcción de los entrepisos y columnas del edificio C, las cuales son las que se toman como referencia para la elaboración de los cronogramas para el edificio D.

También fue necesario la utilización de los planos estructurales para conocer el área de cada uno de los entrepisos.

El conocer la forma en cómo se construyen también fue fundamental para poder crear los cronogramas, ya que gracias a esto se pueden generar diferentes escenarios de como van a estar distribuidos los sistemas de encofrado y con esto determinar cuál es la opción mas viable para el proyecto desde el aspecto económico y de tiempo.

Estos cronogramas se generan en el programa MS Project, donde se van modificando la distribución de los sistemas de encofrados, el precio de los sistemas y también la duración de ciertas actividades, con la finalidad de desarrollar las iteraciones necesarias para poder obtener un cronograma con el tiempo y la cantidad de dinero más adecuada, al realizar una asignación de los recursos necesarios para el desarrollo del proyecto.

Además, a las diferentes actividades de los cronogramas se les asigno un código de la EDT (Estructura de Desglose de Trabajo), con la finalidad de organizar de una forma jerárquica las actividades.

A partir de las iteraciones generadas, se elige cual es el sistema de encofrados de

entrepiso y el de columnas y muros, que se utilizará para el desarrollo de los siguientes objetivos.

Modelos 3D, 4D y 5D

El tercer objetivo consiste en la creación de animaciones 3D y modelos 4D y 5D a partir de programas especializados en estos temas.

Modelo 3D

El modelo 3D fue desarrollado en el software Revit. Para iniciar el modelado del edificio, se necesitó tener los planos estructurales sobre los cuales se puedan dibujar los diferentes elementos.

Estos planos ya escalados se exportaron a Revit, pero antes de exportarlos se procedió a preparar el espacio de trabajo, donde a partir de las alturas proporcionadas en los mismos planos, se colocaron las líneas de referencia de los niveles correspondientes. Luego se exportó el primer plano y sobre este se dibujó la grilla de ejes tanto en X como en Y, la cual fue replicada para todos los niveles. Ya teniendo el espacio de trabajo listo se exportaron todos los planos a Revit.

Se inicio la modelación con el plano del primer nivel, donde primeramente se modeló el entrepiso a partir de la identificación del tipo de losa que aparece en cada plano. Este tipo de losa y los demás tipos se encuentran en un plano denominado detalles de entrepiso, el cual incluye un nombre para cada tipo de losa, el peralte en centímetros y las mallas de acero que se deben de utilizar.

En los planos de entrepisos ya vienen incluidos las columnas, pero al igual que las losas, estos elementos vienen con una identificación, la cual se debe de buscar en el plano detalles de columna donde vienen las dimensiones de las columnas y el detalle de refuerzo tanto longitudinal como transversal. En el caso de los muros es igual, pero se debe de buscar el tipo de muro en los planos denominados detalles de muros de concreto.

Para modelar estos elementos en Revit se debe de ingresar en la sección estructural del programa y utilizar las familias precargadas en el software o crear nuevas familias. Para el caso del modelado de estos elementos, se utilizaron las familias precargadas de Revit. Para cada elemento se accedió a las propiedades para modificar las dimensiones según fueran especificadas en los planos y también definir cuál es el nivel asociado para el caso de los entrepisos, para las columnas y muros se definen entre cuales niveles se encuentran para que el programa determine la altura y pueda enlazar estos elementos con los entrepisos inferiores y superiores. Todo este proceso de modelación de la estructura de concreto de los elementos fue replicado para todos los niveles del edificio.

Para modelar el acero refuerzo se utilizaron las familias de varillas precargadas en Revit, en las cuales la única modificación que se realizó fue el cambiarle el nombre a cada una, con el fin de tener la misma nomenclatura de los planos.

En los entrepisos se colocaron las mallas de acero especificadas en los planos y también los bastones inferiores y superiores, para los cuales fue necesario el colocar los planos respectivos de cada nivel en el modelo para que el acero fuera colocado en la posición correcta. Ya teniendo el acero inferior y superior en los entrepisos, se procedió a modelar los cables de postensado. Se modelaron 2 tipos de cables de postensado, los distribuidos y los concentrados o bandas como también se le conocen.

En las columnas fue modelado el acero de refuerzo tanto transversal como longitudinal según las especificaciones. Tanto los aros como los ganchos fueron colocados con el espaciamiento y el doblado requerido.

El caso de los muros fue similar al de las columnas en cuanto al modelado del acero de refuerzo, pero como son elementos más largos estos deben de ser dibujados a partir de líneas de boceto en la ubicación indicada en planos.

Ya teniendo todos los elementos modelados, se siguió con el modelado de los encofrados para columnas, muros y entrepisos.

Primeramente, se realizó el modelado de los encofrados para los muros y las columnas a partir del sistema de encofrado elegido. Todos los paneles fueron modelados como familias y al tenerlos listos se generaron otras familias en las cuales se juntaban para encofrar los elementos y

que a la hora de incluirlos en el modelo, estos actúen como uno solo.

Seguidamente del modelado de los encofrados para columnas y muros, se procedió a modelar los encofrados para entresijos según el sistema elegido. Al igual que para los encofrados de columnas y muros, los elementos del sistema elegido para encofrar los entresijos se modelaron con familias aparte y luego se juntaron en otra familia para que actúen como un solo elemento dentro del proyecto.

Ya teniendo todos los elementos modelados, se utilizó la herramienta de creación de parámetros compartidos de Revit, para poder asignar parámetros que describan a cada uno de los elementos y que ayuden a desarrollar la coordinación entre el modelo 3D y el cronograma, y que permitan generar los modelos 4D y 5D. La herramienta de parámetros compartidos consiste en la creación de un parámetro que pueda ser aplicado a los elementos seleccionados y que el usuario pueda asignar un nombre en específico.

Al tener todos los elementos modelados y con sus respectivos parámetros, se procede a exportar este archivo al programa Navisworks para crear los modelos 4D y 5D.

Lo explicado anteriormente se visualiza con los pasos mostrados en el diagrama mostrado en la figura 24:

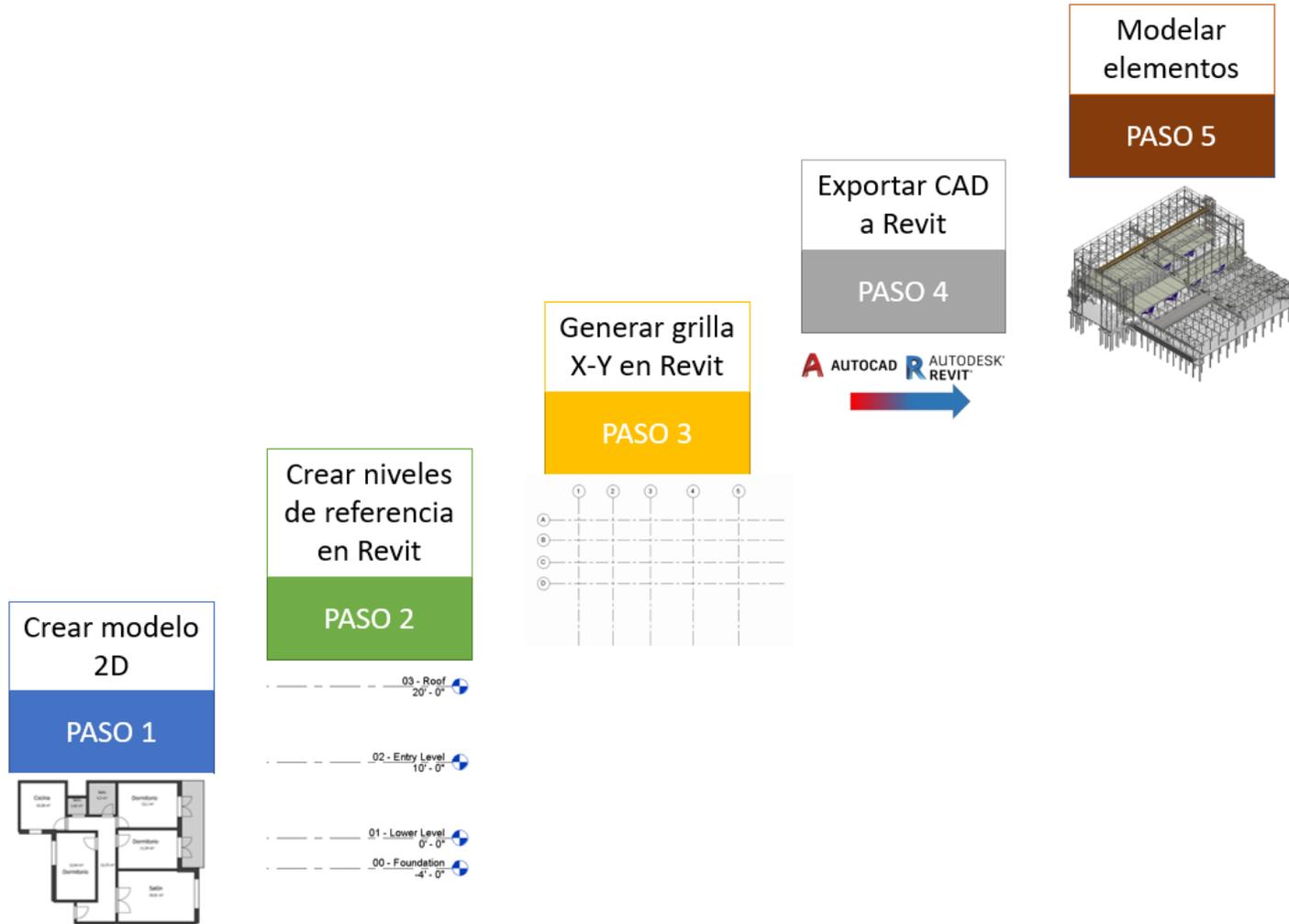


Figura 24. Pasos para crear un modelo 3D
Fuente: Elaboración propia

Modelos 4D y 5D

Para la creación de los modelos 4D y 5D, es necesario generar una coordinación entre el cronograma del proyecto y el modelo 3D. Para poder crear esta coordinación se utilizó el programa Navisworks de la empresa Autodesk, el cual es un programa especializado en la creación de estos modelos.

Para iniciar con esta coordinación, primeramente, se deben de exportar los archivos a Navisworks. En el caso del modelo 3D, se instaló un complemento de Navisworks en Revit, el cual crea un archivo de Navisworks de una forma más rápida. En el caso del cronograma creado en Project, este debe importado directamente desde Navisworks a partir de la herramienta Timeliner, la cual es la herramienta destinada para visualizar y modificar los cronogramas en Navisworks.

Ya teniendo los archivos en Navisworks, se procede a enlazar los elementos del modelo 3D a cada una de las actividades del cronograma según correspondan. Esta tarea es fundamental para crear la coordinación entre ambos elementos y es por ello por lo que se debe ser muy cuidadoso a la hora de realizarla, ya que es muy fácil equivocarse. Este enlace inicia al asignar un nombre a cada uno de los conjuntos de elementos del modelo 3D utilizando los conjuntos de selección, los cuales son una herramienta que consiste en que el usuario seleccione los elementos requeridos y los guarde como un conjunto, lo que permite que en cualquier momento se pueda acceder a este conjunto y que se puedan asignar a una tarea específica del cronograma.

En este punto de la coordinación es donde se aprovecha el haber creado un parámetro para identificar los elementos del modelo 3D, ya que como cada elemento posee un código, la búsqueda de elementos en Navisworks es sumamente sencilla. Para esta tarea se utiliza la herramienta de búsqueda de elementos, en la cual se debe de asignar la categoría, la propiedad, la condición "igual a" y finalmente el valor que corresponde al código asignado. Como las tareas del cronograma generalmente corresponden a grupos de elementos, el programa lo que hace es buscar y señalar aquellos elementos que fueron asignados con ese código. Este conjunto de elementos se

guarda con el mismo nombre del código asignado, con la finalidad de crear la coordinación entre los elementos modelados y las tareas del cronograma.

Ya teniendo todos los conjuntos asignados y nombrados, se procede a utilizar el enlazado con la herramienta Timeliner. Este enlazado se puede realizar de 2 formas, la primera corresponde a enlazar manualmente cada conjunto de selección a cada una de las tareas según sea su código y la segunda corresponde a realizar esta misma tarea, pero utilizando un enlazado automático. Al tener tanto los elementos modelados como el cronograma los mismos nombres en común, es evidente el utilizar el enlazado automático, porque si se utilizara el enlazado manual, tomaría muchísimo tiempo hacerlo y perdería utilidad todo el proceso de asignación de los códigos. Para utilizar este enlazado automático es necesario definir reglas, las cuales se basan en elegir la columna del cronograma que se tomara como referencia y también seleccionar que los elementos contenidos en esta columna se enlacen con los conjuntos de selección que llevan el mismo nombre. Ya teniendo definida las reglas, se realiza el enlazado automático y ahora todas las tareas poseen un conjunto de selección asociado.

Ya teniendo todas las tareas enlazadas con su conjunto de selección respectivo, se procede a determinar el tipo de tarea correspondiente. Este parámetro se encuentra en una de las columnas del cronograma y cumple la función de asignar un status a cada una de las tareas, al desplegarse una lista donde se puede seleccionar si los elementos enlazados a la tarea van a ser parte de la construcción, o sea, que van a ser fijos, si van a ser temporales o si se van a demoler. La asignación de este status a las tareas es fundamental, ya que si esto no se hace, no se pueden generar las simulaciones. Además de asignar el tipo de tarea, existe una ventana de configuración dentro de la herramienta timeliner, en la cual se debe de configurar el aspecto que tendrán los elementos antes, al inicio, durante y al final de la simulación, según el tipo de tarea asignada.

Cuando ya se tiene la asignación del tipo de tarea y la configuración de aspecto, se prosigue con la creación de la simulación. Para poder crearla, se utiliza la ventana de simular presente en la herramienta timeliner, donde se

accede a la configuración y se determina cuanto tiempo va a representar una cantidad de tiempo elegida dentro de la simulación. Además, se crean vistas que se incluyen en un momento seleccionado de la simulación, permitiendo tener una perspectiva más real de cómo se va a ir construyendo el edificio.

La figura 25 muestra un diagrama con los pasos a seguir para crear los modelos 4D y 5D:

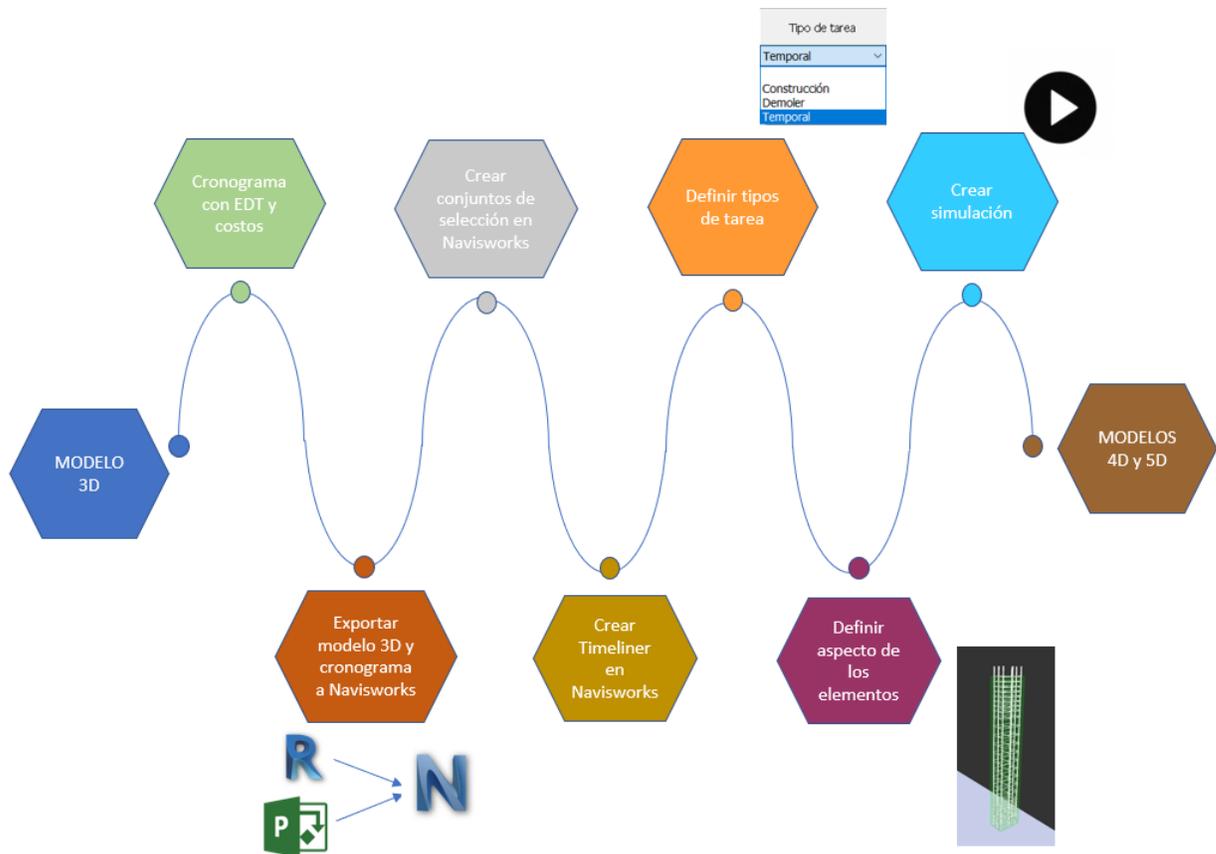


Figura 25. Diagrama para crear un modelo 4D y 5D
Fuente: Elaboración Propia

Gestión de calidad

Para el cuarto y último objetivo, se desarrolla una propuesta de planificación de la gestión de calidad de los procesos constructivos seleccionados. Para realizar esta propuesta, primeramente, se definen las actividades necesarias para el desarrollo de los procesos constructivos de entrepisos, columnas y muros, las cuales permitan llevar un control de la calidad. Al tener un listado de estas actividades, se procede a elaborar diagramas de Ishikawa y diagramas de flujo, que ayuden a comprender de una mejor forma el proceso constructivo de estos elementos estructurales.

Para incluir todos los datos recopilados en listas y gráficos, se utilizan plantillas generadas en Excel, las cuales incluyen los diagramas de Ishikawa para el caso de los procesos de construcción de entrepisos, columnas y muros, y en el caso de las actividades o tareas específicas de estos procesos, se incluirán hojas de control de calidad y diagramas de flujo que permitan al usuario una mejor comprensión del desarrollo de estas actividades. Además, en estas plantillas se incluyen hojas donde se pueden guardar los datos contenidos en las hojas de control de calidad a manera de base de datos. Estas plantillas se presentan con una interfaz de acceso sencillo al utilizar botones creados con macros, pero que se restringe el poder realizar modificaciones con la finalidad de conservar los datos contenidos.

Resultados

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos para cada objetivo específico planteado para el proyecto, siguiendo la metodología descrita en el capítulo anterior.

Análisis de los sistemas de encofrado

Para este primer objetivo se obtuvieron resultados referentes a la recopilación de datos del Edificio C y Edificio D, que serán fundamentales para poder desarrollar los demás objetivos y tener un mapa más claro de lo que se busca con el proyecto. Esta recopilación fue desarrollada con la ayuda de entrevistas al ingeniero Marlon Navarro de la empresa ROCCA Development Group y los proveedores de encofrados, las cuales se encuentran en la sección de apéndices.

Edificio C

Este proyecto denominado Torre C, el cual está ubicado en Santa Ana de San José, fue desarrollado por la empresa ROCCA y consta de 10 niveles destinados para el comercio y la hotelería. La distribución de la ocupación de los niveles del edificio y el área que comprenden, se muestran en el cuadro 3 que se presenta a continuación:

Cuadro 3. Superficie y ocupación de los niveles del edificio C

Nivel	Área (m ²)	Ocupación
Nivel sótano edificio C+D	8763.50	Parqueo
Nivel sótano edificio C+D	8763.50	
Nivel sótano edificio C+D	8763.50	
Nivel 01	2323.25	Comercial
Nivel 02	2659.57	Hotel
Nivel 03	2306.32	
Nivel 04	1822.68	
Nivel 05	1822.68	
Nivel 06	1822.68	
Nivel 07	272.00	

Como se puede ver en el cuadro 3, un aspecto importante a destacar, son los 3 primeros niveles destinados a parqueos, ya que estos corresponden a niveles compartidos entre los edificios C y D.

El sistema constructivo utilizado en este edificio fue el de entrepisos de concreto postensado, soportados por columnas y muros de concreto.

La duración de la construcción del edificio fue de 9 meses y tuvo un costo aproximado a los 7 millones de dólares.

El sistema de encofrado para entrepisos utilizado en el edificio C, fue el sistema llamado Aluma Frame perteneciente a la empresa Aluma System. Este sistema corresponde a un sistema de mesas compuesto por marcos y viguetas de aluminio, y láminas de plywood fenólicas de 19 mm de espesor. La figura 24 muestra la estructura de este sistema de encofrado:



Figura 26. Sistema de mesas Aluma Frame
Fuente: Aluma System, 2019

En el proyecto se utilizaron 3 tamaños de mesas, las cuales rondaban los 20m² a 24m² y se colocaban de 800m² a 1200m² en un periodo de 2 a 3 días.

El proceso de armado de estas mesas siguió el siguiente procedimiento:

1. Primeramente, se arma el andamio de carga al unir en los cuatro lados de la estructura los arriostres laterales a los puntales, los cuales son ajustados a la altura requerida. Además, en la parte inferior de los puntales se colocan accesorios de acople que se ven en la figura 25, y con esto tener un mejor agarre con la superficie.



Figura 27. Accesorios de acople inferiores.
Fuente: Aluma System, 2019

2. Una vez terminado el andamio de carga, se colocan sobre los lados más cortos las vigas principales, las cuales se unen a la estructura mediante accesorios de acople superiores, que se observan en la figura 26:



Figura 28. Accesorios de acople superiores.
Fuente: Aluma System, 2019

3. Atornilladas a las vigas principales se colocan perpendicularmente las vigas secundarias.
4. Finalmente, sobre las vigas secundarias se colocan las láminas de plywood fenólicas.

El sistema Aluma Frame tiene un peso promedio de 19 kg y puede soportar hasta 44.5 kN/pata. Además, todos los marcos del sistema tienen un ancho de 1.83 m y pueden extenderse desde 0.96m hasta 2.48m de altura. (Aluma Systems, 2020)

En el momento en que se tiene que trasladar las mesas a otro nivel, el sistema no tenía que desarmarse ya que se movilizaba completo, lo cual representaba una disminución del tiempo por desarmado. Para la movilización, primeramente, a la mesa se le disminuía la altura con la ayuda de los ajustes de altura que poseían los puntales que conformaban el marco de la mesa. Luego, se colocaba en la mesa una estructura con rodines como la que se ve en la figura 27, los cuales permitían un traslado más ágil por alguno de los extremos del edificio.



Figura 29. Estructura con rodines para el traslado de las mesas Aluma Frame.
Fuente: Aluma System, 2019

Cuando la mesa llega al extremo del edificio, se le quita la estructura de rodines y con la ayuda de la grúa, se le coloca un elemento llamado uña que se puede ver en la figura 28, que permite la movilización hacia un piso superior.



Figura 30. Uña para movilización de las mesas entre pisos.
Fuente: Aluma System, 2019

Este sistema presenta una serie de ventajas las cuales motivaron su uso en la construcción del edificio C, pero como todo sistema también presenta sus desventajas. Ambas condiciones del sistema se muestran en el cuadro 4:

Cuadro 4. Ventajas y desventajas del sistema Aluma Frame

Ventajas	Desventajas
El sistema tiene una gran estabilidad estructural, lo que da una mayor protección al personal y a la inversión hecha en cada colada.	Al ser equipo de aluminio, es muy susceptible a daños.
La forma en como está compuesto el sistema, permite el no tener que estar armando y desarmando en cada ciclo.	Debido al tamaño de mesas, se debía generar una logística para desformaletear, si no generaba un problema de tránsito de las mesas, ya que se requiere ir quitando mesas y colocando puntales.
Agilidad de colocación y facilidad de abarcar grandes áreas en poco tiempo.	Debido a que no se contempló el uso de la grúa para el movimiento de las mesas, generó una sobre asignación de la grúa para la movilización de las formaletas de las columnas y las mesas.
Disponibilidad del recurso requerido.	Para cada piso se requirió una modulación de mesas, por lo que si los planos no estaban a tiempo se podría generar un atraso o una inadecuada distribución de las mesas.
Costo de renta favorable por ser un sistema que se estaba probando en el país.	

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del proveedor Aluma System

Para los entrepisos de este edificio se utilizaron sistemas desadheridos para los 3 niveles de sótanos y sistemas adheridos para los demás niveles. Los espesores de los entrepisos variaban de 21 a 40 cm.

Para la construcción de estos entrepisos se seguía un ciclo de actividades, el cual se puede ver en la figura 29.

Además, se siguió un ciclo para la construcción de columnas que vemos en la figura 30 y que se acoplaba con el de entrepisos para poder ir desarrollando cada nivel del edificio.

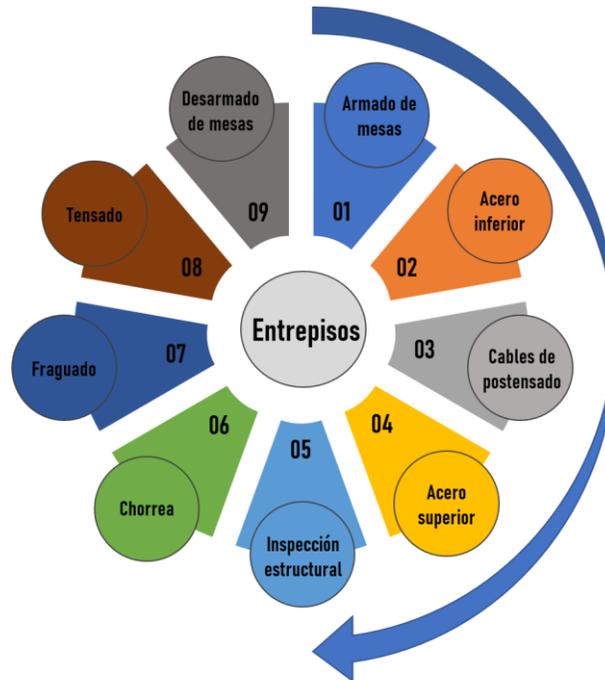


Figura 31. Ciclo de postensado de entrepisos
Fuente: Elaboración propia

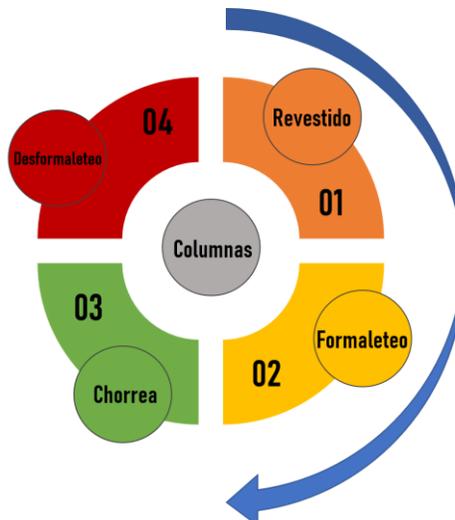


Figura 32. Ciclo de construcción de columnas
Fuente: Elaboración propia

Las actividades de los ciclos mostrados tuvieron un tiempo que se trataba de mantener cada vez que se repetía el ciclo en cada nivel. Con la ayuda del software MS Project se generó un cronograma para poder visualizar la duración de cada actividad, así como las dependencias entre las actividades y con esto generar un ciclo con la menor duración posible. La figura 31 muestra el cronograma generado a partir de los datos proporcionados por el ingeniero de la empresa ROCCA y que servirán de base para el edificio D.

59		◀ Ciclo de postensado de entepiso	13 días	mié 1/4/20	mié 22/4/20	
60		Armado de mesas	4 días	mié 1/4/20	sáb 4/4/20	
61		Acero inferior	2 días	vie 3/4/20	sáb 4/4/20	60FC-2 días
62		Cables de postensado	3 días	sáb 4/4/20	mar 14/4/20	61CC+1 día
63		Acero superior	2 días	lun 13/4/20	mar 14/4/20	62CC+1 día
64		Inspección Estructural	1 día	mié 15/4/20	mié 15/4/20	63
65		Chorrea	1 día	jue 16/4/20	jue 16/4/20	63,64
66		Fraguado	3 días	jue 16/4/20	dom 19/4/20	65CC
67		Tensado	1 día	lun 20/4/20	lun 20/4/20	66
68		Desarmado	2 días	mar 21/4/20	mié 22/4/20	67
69		◀ Columnas y Muros	7 días	vie 17/4/20	vie 24/4/20	
70		Revestido	3 días	vie 17/4/20	lun 20/4/20	65
71		Formaleteo	4 días	sáb 18/4/20	mié 22/4/20	70FC-2 días
72		Chorrea	3 días	mar 21/4/20	jue 23/4/20	71FC-2 días
73		Desformaleteo	3 días	mié 22/4/20	vie 24/4/20	72FC-2 días

Figura 33. Cronograma basado en datos del Edificio D
Fuente: Elaboración propia

Edificio D

Este edificio denominado Torre D, será el que construirá la empresa ROCCA y para el cual se desarrolló este proyecto. Se construirá a un lado del edificio C y contará con 8 niveles sumados a los 3 niveles de sótanos compartidos entre ambos edificios. La descripción y ocupación de cada nivel se muestra en el cuadro 5.

Para este edificio se analizaron 6 sistemas de encofrado para entepisos de 4 proveedores diferentes, con la finalidad de elegir cual el sistema mas adecuado para el proyecto y con esto poder desarrollar los demás objetivos. Los cuadros 6 y 7 muestran las características mas relevantes de estos 6 sistemas.

Cuadro 5. Superficie y ocupación de los niveles del edificio D

Nivel	Área (m ²)	Altura (m)	Ocupación
Nivel sótano edificio C+D	8763.50	4.70	Parqueo
Nivel sótano edificio C+D	8763.50	4.70	
Nivel sótano edificio C+D	8763.50	4.70	
N01	1995.40	3.75	Comercial
N02	2013.12	3.75	
N03	2013.12	3.75	
N04	2016.62	3.75	
N05	1991.50	3.75	
N06	1995.40	3.75	
N07	1946.65	3.75	
N08	954.14	3.75	

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 6. Descripción y características de los sistemas de encofrado de entrepisos

Descripción		Características			
Nombre	Sistema de encofrado	Estructura	Precio de alquiler mensual (\$/m ²)	Rendimiento (m ² /día)	Disponibilidad
Terra Equipos	HD 150	Vigas de madera soportadas por andamios de carga de acero.	7.25	600	Inmediata
RENTECO	Sistema de mesas DOKA Table	Vigas de madera soportadas por puntales de acero.	7.50	600	Inmediata
FYPSA	Mesas Volantes	Vigas de madera soportadas por puntales de acero.	6.55	600	No inmediata (de 8 a 10 semanas)
	Rapideck	Sistema de paneles de aluminio soportados por puntales y cerchas de acero.	9.00	500	No inmediata (aproximadamente 1 mes de importación)
ALUMA	ALUMA Frame	Vigas de aluminio soportadas por marcos de aluminio.	6.50	600	Inmediata
	TOPFLEX	Vigas de madera soportadas por puntales de acero.	6.00	600	Inmediata

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de los diversos proveedores

Cuadro 7. Ventajas y desventajas de los sistemas de encofrado de entrepisos

Descripción		Características	
Nombre	Sistema de encofrado	Ventajas	Desventajas
Terra Equipos	HD 150	<ul style="list-style-type: none"> • Desarmado sencillo y no se deben de desarmar todas las piezas, ya que se utilizan carros con rodines. • Mayor estabilidad lateral por las abrazaderas diagonales que posee. 	<ul style="list-style-type: none"> • Circulación complicada en los entrepisos, debido al sistema de andamios. • Uso complicado en pisos no nivelados, como por ejemplo lastre.
RENTECO	Sistema de mesas DOKA Table	<ul style="list-style-type: none"> • Fácil armado y desarmado debido a su poca cantidad de piezas. • Facilidad para ajustar la altura requerida, ya que los puntales poseen el ajuste en la parte inferior. 	<ul style="list-style-type: none"> • Debilidad lateral debido a que los puntales no poseen arriostres laterales.
FYPSA	Mesas Volantes	<ul style="list-style-type: none"> • Fácil armado y desarmado debido a su poca cantidad de piezas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Debilidad lateral debido a que los puntales no poseen arriostres laterales.
	Rapideck	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema muy liviano, lo que permite una fácil movilización. • Su armado y desarmado se realiza sin la ayuda de una grúa, lo cual permite un ahorro considerable de dinero. 	<ul style="list-style-type: none"> • Susceptibilidad a los daños por poseer elementos de aluminio.
ALUMA	ALUMA Frame	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema muy liviano, lo que permite una fácil movilización. • Gran capacidad estructural. 	<ul style="list-style-type: none"> • Susceptibilidad a los daños por poseer elementos de aluminio.
	TOPFLEX	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema con una alta versatilidad. • Costo menor que el sistema ALUMA Frame. • Alta capacidad estructural, lo que permite su utilización en losas con espesores mayores a los 30 cm. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema con elementos más pesados, lo que podría generar una mayor dificultad de movilización.

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de los diversos proveedor

Determinación del tiempo de ejecución óptimo para la construcción de entrepisos y columnas

Teniendo como base las actividades y tiempos del Edificio C mostrados anteriormente, se procedió a realizar los diferentes cronogramas teniendo como variables, el mejor precio de alquiler mensual de encofrados para los elementos seleccionados y la cantidad de cuadrillas de encofrado a subcontratar.

Con respecto a la cantidad de cuadrillas de encofrado para entrepiso, fueron analizados 3 escenarios diferentes, tomando en cuenta el hecho de que cada entrepiso del edificio, exceptuando el último, se dividen en 2 secciones, la A y la B. El área de las secciones para cada entrepiso se muestra en el cuadro 8, las cuales son variables debido a las dimensiones de cada losa.

Cabe destacar que el dividir los entrepisos no es realizado solamente para poder analizar los 3 escenarios planteados, si no que esta es la forma en cómo se construyen y es por este motivo que cada uno de ellos tiene una junta

de piso para poder unirlos una vez que son colados.

Cuadro 8. Áreas de las secciones de los entrepisos

	Área (m ²)	
	Sección A	Sección B
N01	999.62	995.76
N02	968.34	1044.78
N03	968.34	1044.78
N04	970.06	1046.56
N05	963.97	1027.51
N06	964.73	1030.64
N07	964.80	981.85
N08	954.14	

Fuente: Elaboración propia

El primer escenario corresponde a la utilización de 3 cuadrillas de sistema de encofrado de entrepisos, lo cual equivale a abarcar un piso y medio, el segundo escenario a 2 cuadrillas lo que equivale a abarcar 1 piso completo y el tercer escenario corresponde a 1.5 cuadrillas lo que equivale a abarcar un 75% del área de un piso. Las figuras 32, 33 y 34, muestran cual es el movimiento que tendrán estas cuadrillas conforme vaya pasando el tiempo de construcción del edificio.

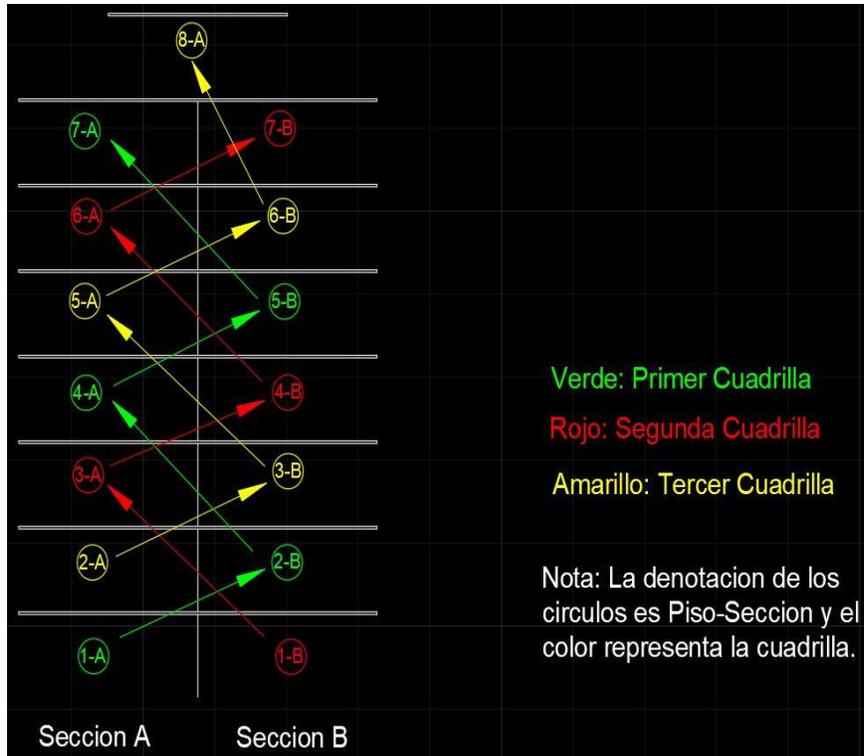


Figura 34. Escenario 1 de 3 cuadrillas de encofrado de entresuelo en el edificio D.
 Fuente: Elaboración propia



Figura 35. Escenario 2 de 2 cuadrillas de encofrado de entresuelo en el edificio D.
 Fuente: Elaboración propia



Figura 36. Escenario 3 de 1.5 cuadrillas de encofrado de entrecimso en el edificio D.
 Fuente: Elaboración propia

Cuadro 9. Tiempo y precio de los sistemas de encofrado para entrecimso según el número de cuadrillas

Proveedor	Sistema	Número de cuadrillas					
		3 cuadrillas		2 cuadrillas		1 cuadrilla	
		Tiempo (meses)	Precio (\$)	Tiempo (meses)	Precio (\$)	Tiempo (meses)	Precio (\$)
Terra Equipos	HD 150	4.8	737 342.41	5.3	753 050.63	7.4	770 283.72
RENTECO	Doka Table	4.8	740 446.21	5.3	756 220.55	7.4	773 526.18
FYPSA	Mesas Volantes	4.8	728 651.77	5.3	744 174.85	7.4	761 204.82
	Rapideck	4.7	690 122.21	5.1	704 824.46	7.2	720 953.92
ALUMA	ALUMA Frame	4.8	728 031.01	5.3	743 540.86	7.4	760 556.33
	TOPFLEX	4.8	721 823.41	5.3	737 201.02	7.4	754 071.40

Fuente: Elaboración propia

Modelos 3D, 4D y 5D

Para el cumplimiento de este objetivo, primeramente, se tuvo que realizar un modelado 3D del edificio D con base en los planos estructurales proporcionados por la empresa.

Modelo 3D

Los elementos del edificio D que fueron modelados corresponden a los entresijos, columnas y muros, incluyendo acero de refuerzo y en el caso de los entresijos además del acero, se modelaron los cables de postensado. Tanto el acero de refuerzo como los cables de postensado fueron modelados desde el piso 1 hasta el piso 8, ya que, los pisos inferiores correspondientes a los parqueos que ya están construidos, por ello, no fue necesario modelar el detalle de refuerzo. Solo se modeló la estructura de concreto para poder tener una mejor representación de todo el edificio.

Antes de iniciar con el modelado de los elementos, se tuvo que exportar los planos estructurales que estaban en formato PDF a un archivo CAD, para poder escalarlos y así exportarlos a Revit. Este proceso se realizó desde el piso 1 hasta el 8, y los planos que fueron exportados corresponden a:

- Planos de entresijos
- Planos de bastones inferiores
- Planos de bastones superiores
- Planos de torones concentrados
- Planos de torones distribuidos

Una vez concluido este proceso, en el software Revit se fueron creando los niveles y la rejilla de referencia con base en los datos suministrados en los planos, como se pueden ver en las figuras 35 y 36.

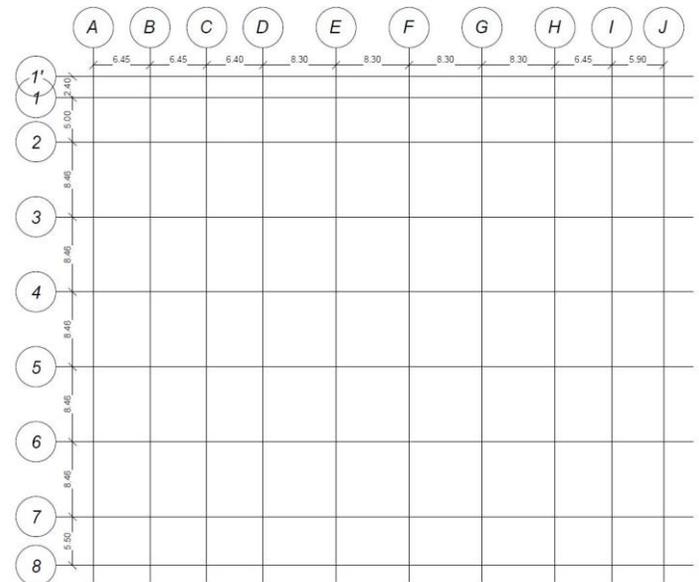


Figura 37. Rejilla de referencia

Fuente: Elaboración propia a partir de planos estructurales

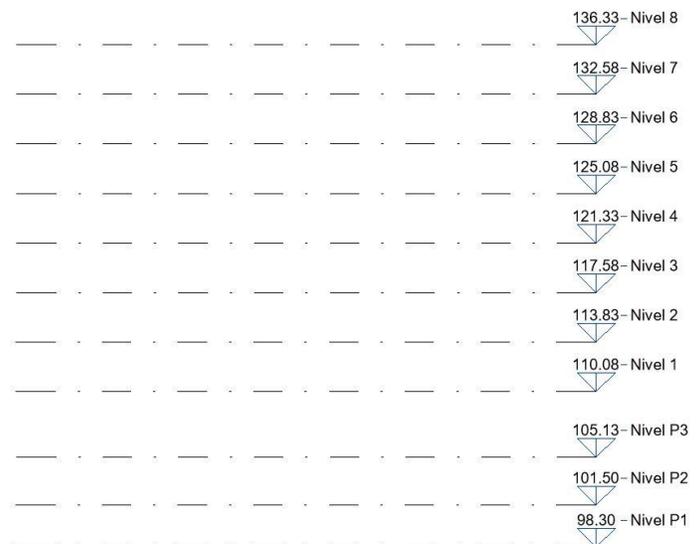


Figura 38. Niveles del edificio D

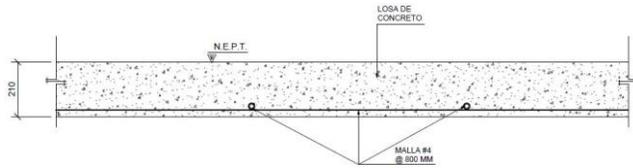
Fuente: Elaboración propia a partir de planos estructurales

Ya teniendo las referencias del edificio, se fueron modelando los diferentes elementos estructurales piso por piso.

Entresijos

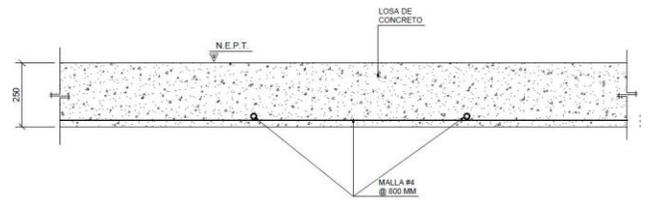
Para los niveles mencionados, se modelaron los entresijos, los cuales tienen un peralte de 21 cm para todos los niveles,

exceptuando el nivel 8, el cual presenta áreas con peraltes de 21 y 25 cm. El acero inferior para ambos tipos de entresijos corresponde a una 7malla #4 a cada 800 mm. Las figuras 37 y 38 muestran el detalle de los entresijos según los planos y la figura 39 muestra la representación de este acero en el modelo 3D.



DETALLE DE ENTRESIJO **L6**
 ESCALA: 1:10
Figura 39. Entresijo de 21 cm de peralte

Fuente: ROCCA Development Group, 2020



DETALLE DE ENTRESIJO **L7**
 ESCALA: 1:10
Figura 40. Entresijo de 27 cm de peralte
 Fuente: ROCCA Development Group, 2020

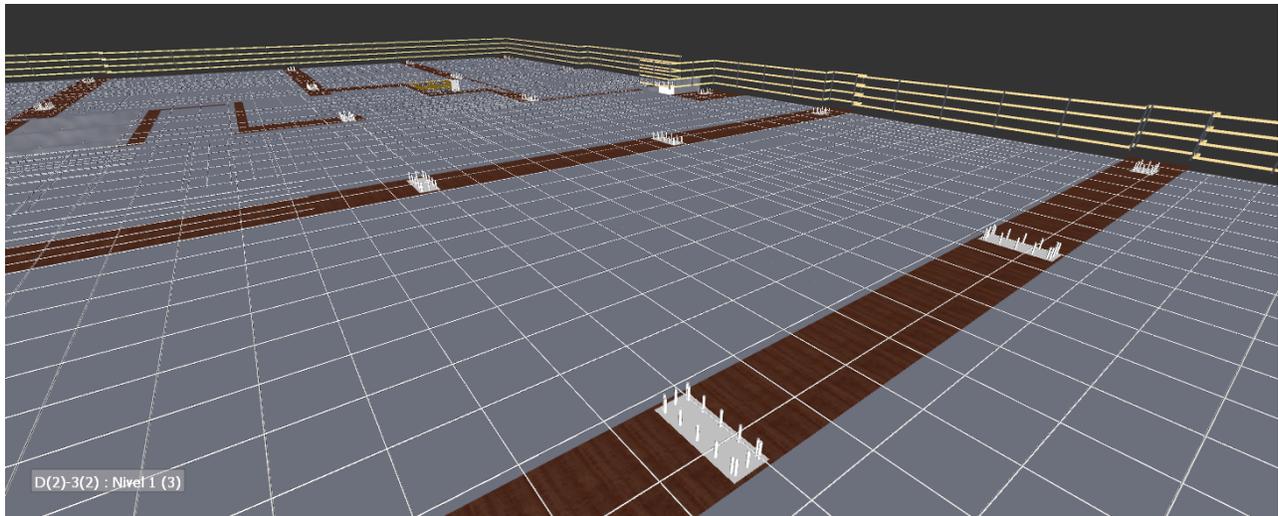


Figura 41. Malla #4 en entresijo del nivel 1
 Fuente: Elaboración propia

Además de la malla inferior #4, los entresijos llevan bastones inferiores con diferentes diámetros de varillas, basados en los planos mostrados en la sección de anexos.

La figura 40 muestra el modelado de esta armadura para una sección del primer nivel.

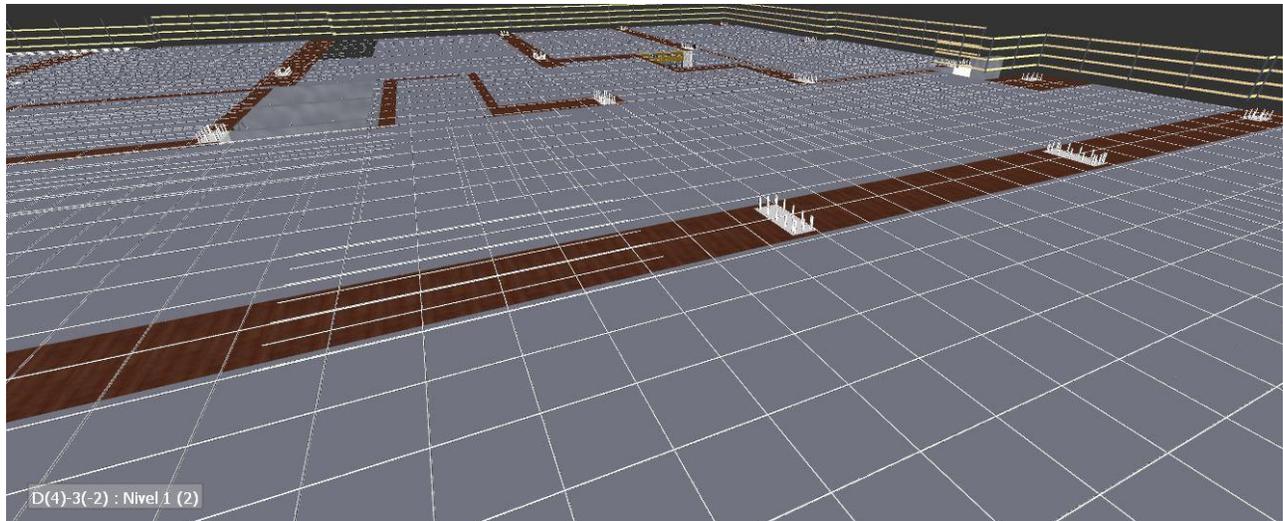


Figura 42. Bastones inferiores en entrecimso del nivel 1
Fuente: Elaboración propia

Cada entrecimso del edificio también tiene acero superior, el cual corresponde a los planos estructurales de bastones superiores, los cuales al igual que los bastones inferiores, presentan

diferentes diámetros de varillas. La figura 41 muestra el modelado de esta armadura dentro de los entrecimso.

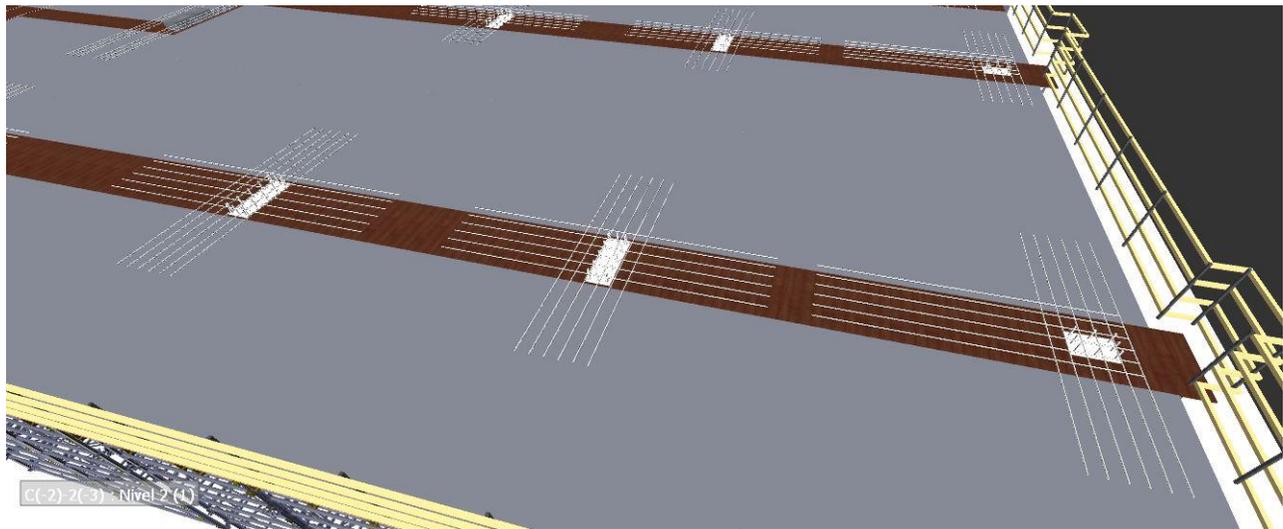


Figura 43. Bastones superiores en entrecimso del nivel 1
Fuente: Elaboración propia

Los cables de postensado también son modelados para cada entrecimso según el detalle de planos, los cuales se componen de torones concentrados y distribuidos. En el modelo los torones concentrados son representados con color rojo y los torones distribuidos con color azul, esto para poder diferenciarlos de una mejor

forma. La figura 42 muestra la representación de los cables de postensado del entrecimso del primer nivel en el modelo 3D.

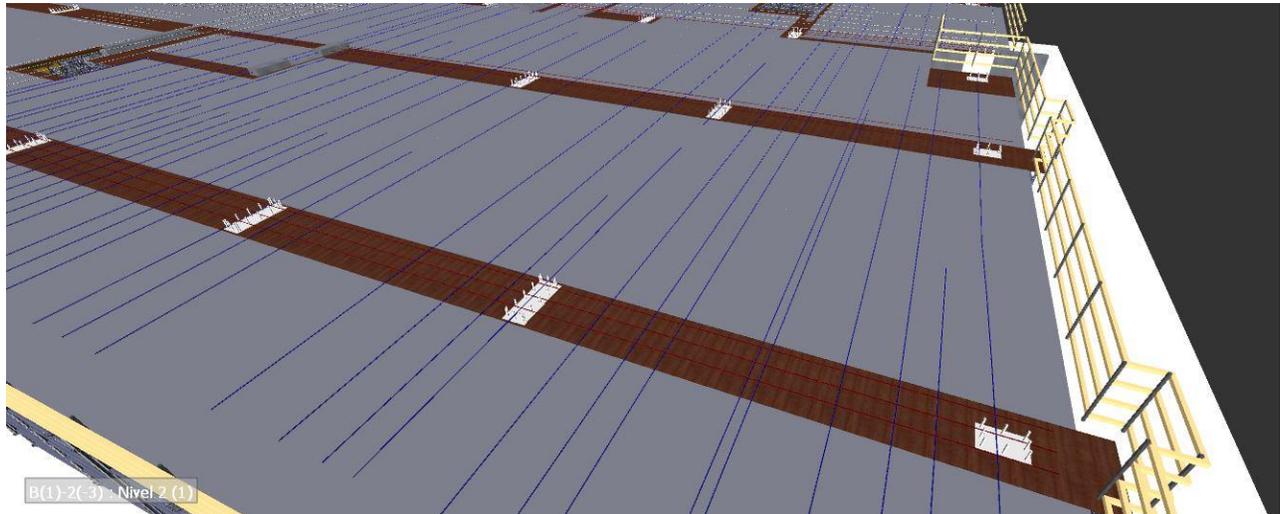
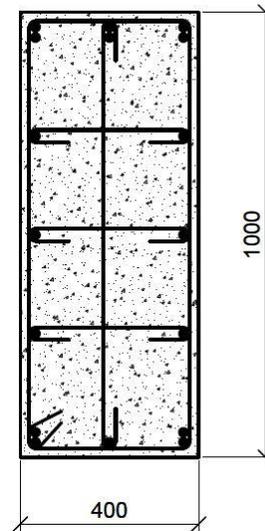


Figura 44. Cables de postensado en entrepiso del nivel 1
Fuente: Elaboración propia

Columnas

Se modelaron todas las columnas del edificio D y se realizó el detalle del acero de refuerzo para los niveles del 1 al 8, en el cual se incluyó tanto el acero longitudinal como el transversal (ganchos y aros). En estos niveles se modelaron 6 tipos diferentes de columnas con diferentes dimensiones y refuerzo longitudinal y transversal. La figura 43 muestra el detalle de la columna DC2a según el plano estructural y las figuras 44 y 45 muestran la columna ya modelada. El detalle y modelado de las demás columnas se muestran en la sección de apéndices.



16#9
12 AROS Y GANCHOS #4
@ 100 MM EN EXTREMOS,
RESTO AROS Y
GANCHOS #4 @ 200 MM
 $f_c = 350 \text{ kg/cm}^2$
DEL N +105.08 M AL N +121.33 M

DC2a

Figura 45. Detalle de refuerzo y dimensiones en columna DC2a

Fuente: ROCCA Development Group, 2020

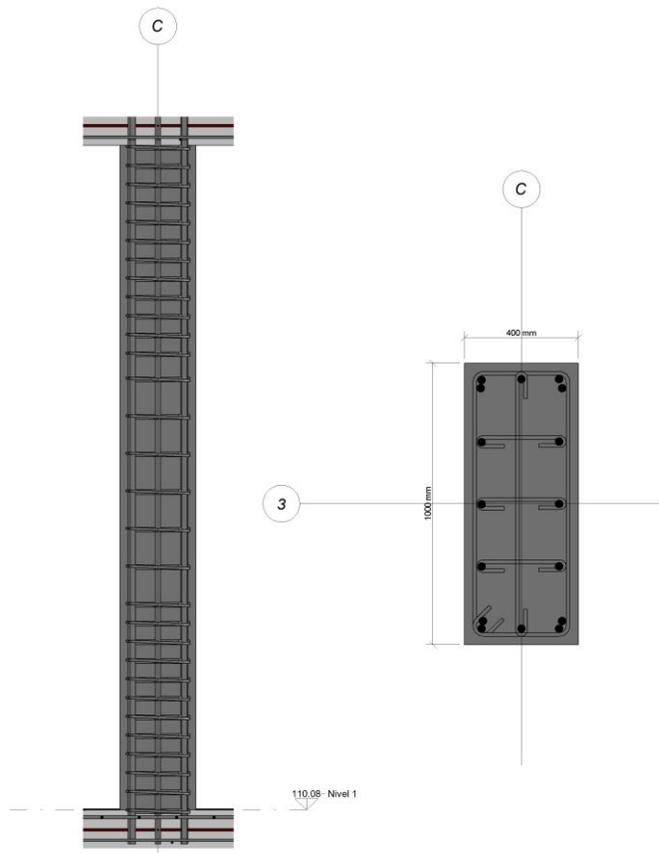


Figura 46. Vista lateral y frontal de la columna DC2a del nivel 1
Fuente: Elaboración propia

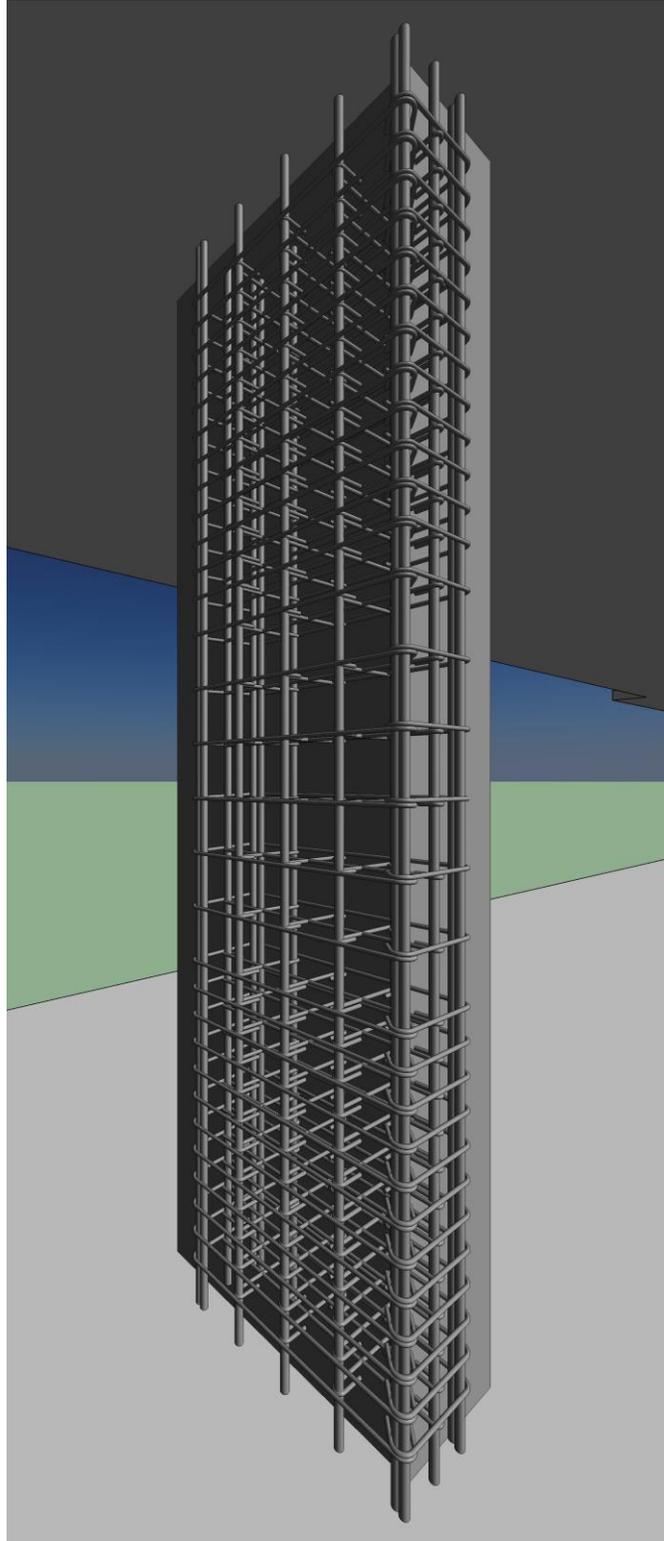


Figura 47. Vista 3D de la columna DC2a del nivel 1
Fuente: Elaboración propia

Muros

Los muros también fueron elementos modelados para los pisos seleccionados con base en los planos estructurales, tomando en cuenta tanto el refuerzo transversal como el longitudinal, en total se modelaron 15 tipos diferentes de muros. En esta sección se muestra el muro DMC10a, los demás muros se muestran en la sección de apéndices. La figura 48 muestra el detalle de este muro según planos y las figuras 46 y 47 muestran el muro modelado.

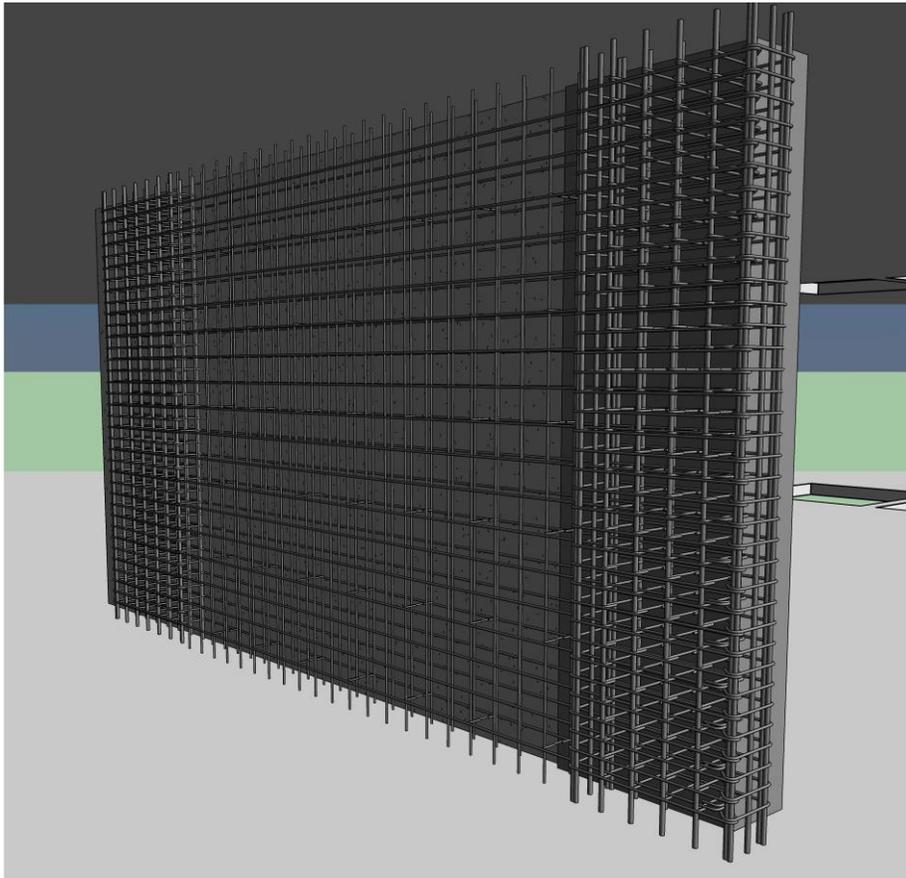


Figura 48. Vista 3D del muro DMC10a del nivel 1
Fuente: Elaboración propia

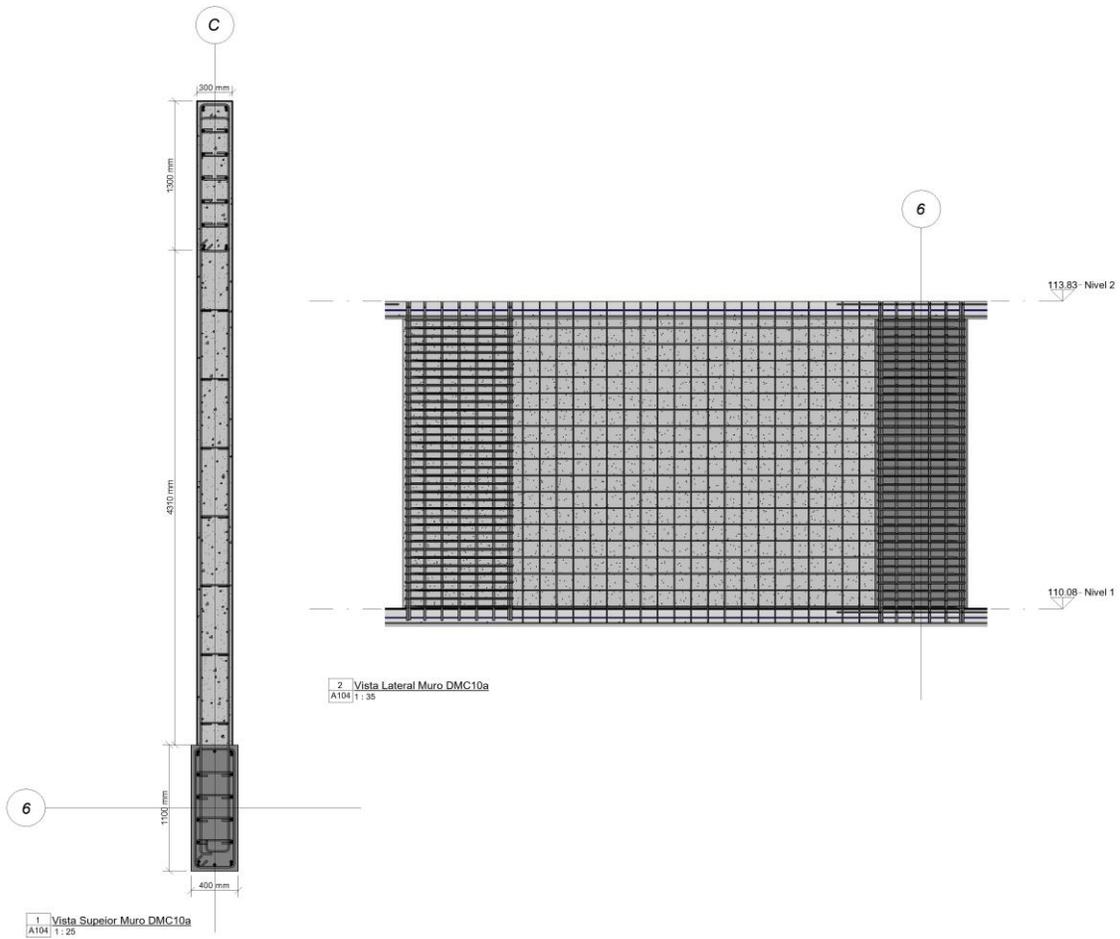
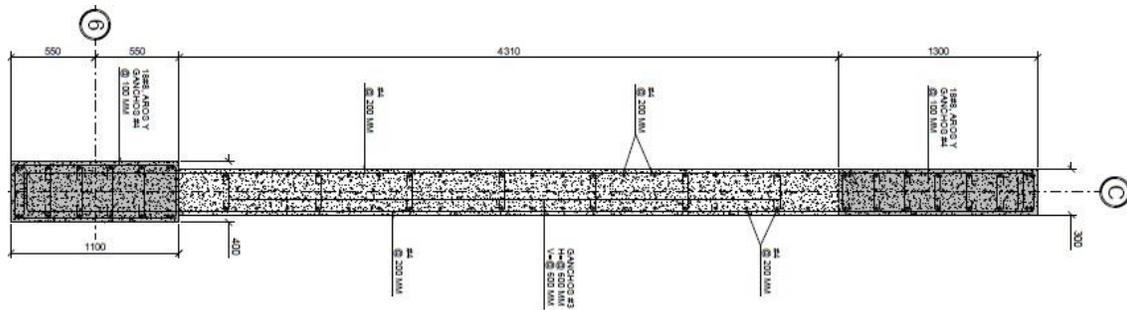


Figura 49. Vista frontal y lateral del muro DMC10a del nivel 1
Fuente: Elaboración propia



MURO DMC10a

ESCALA: 1:20

MURO DE CONCRETO
RESISTENCIA ESTRUCTURAL
AL FUEGO 2 HORAS MINIMO

$f_c = 350 \text{ kg/cm}^2$

DEL N +105.08 M AL N +121.33 M

Figura 50. Detalle de refuerzo y dimensiones de muro DMC10a
Fuente: ROCCA Development Group, 2020

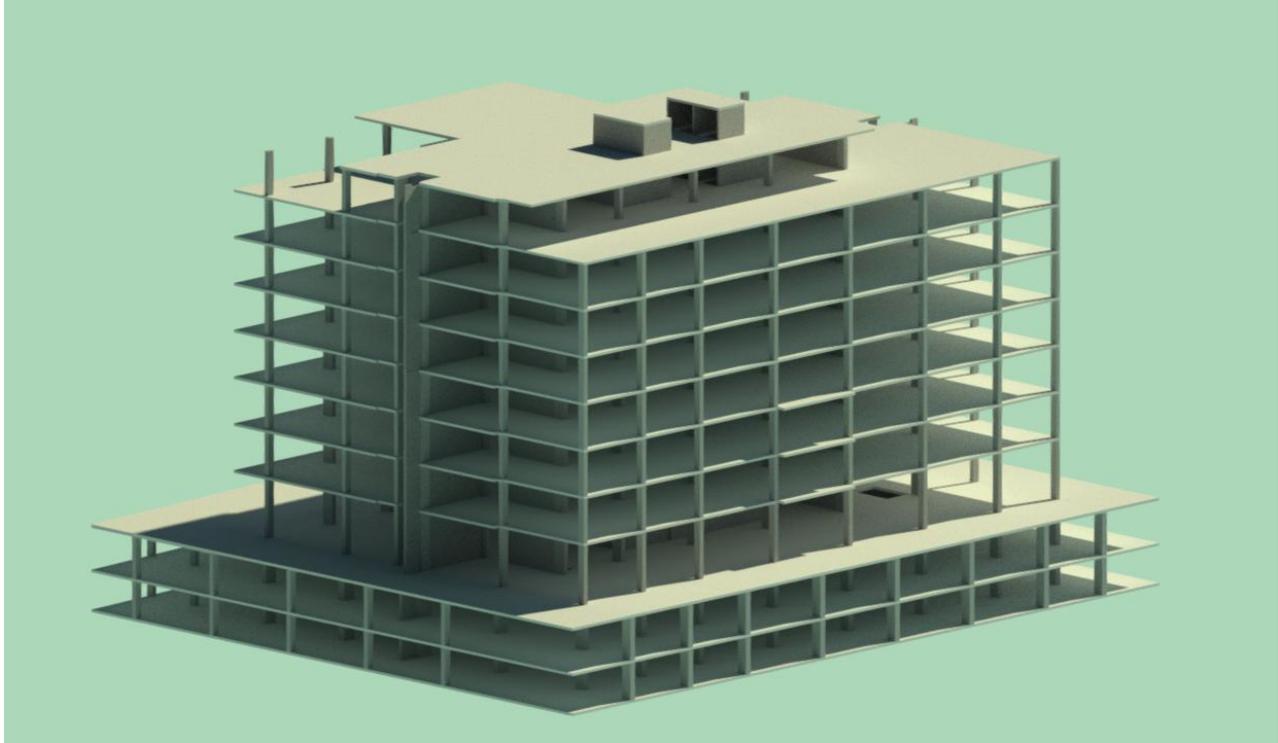


Figura 51. Vista 3D del Edificio D
 Fuente: ROCCA Development Group, 2020

Encofrados para columnas y muros

Además de los elementos estructurales del edificio D, también fueron modelados los encofrados que se necesitan para su construcción. Se modelaron como familias todos los paneles del sistema RASTO-TAKKO de la empresa Aluma System para poder encofrar las columnas y muros del proyecto. La figura 50 muestra el modelado de un panel de 2700x600mm del sistema RASTO-TAKKO, los demás paneles se muestran en la sección de apéndices.

Estos paneles se fueron adecuando a las medidas de las columnas y muros, lo cual permitió generar familias de conjuntos de encofrados para poder colocarlas en el modelo 3D del edificio. La figura 51 muestra el conjunto de paneles necesarios para poder encofrar una columna de 400x1000mm del primer nivel, los demás conjuntos de encofrados para los otros tipos de columnas y los muros se muestran en la sección de apéndices.

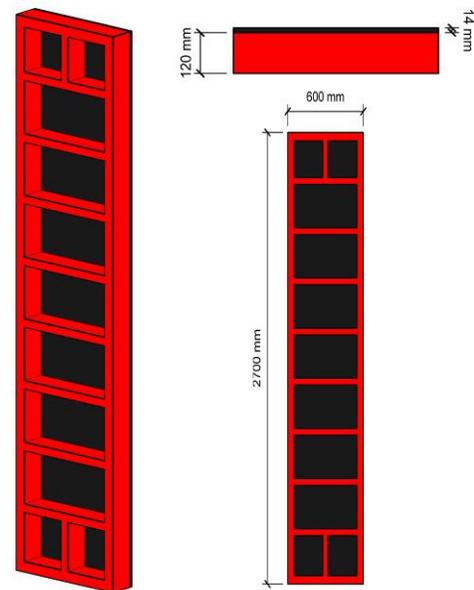


Figura 52. Vistas del panel 2700x600 mm del sistema RASTO-TAKKO
 Fuente: Elaboración propia

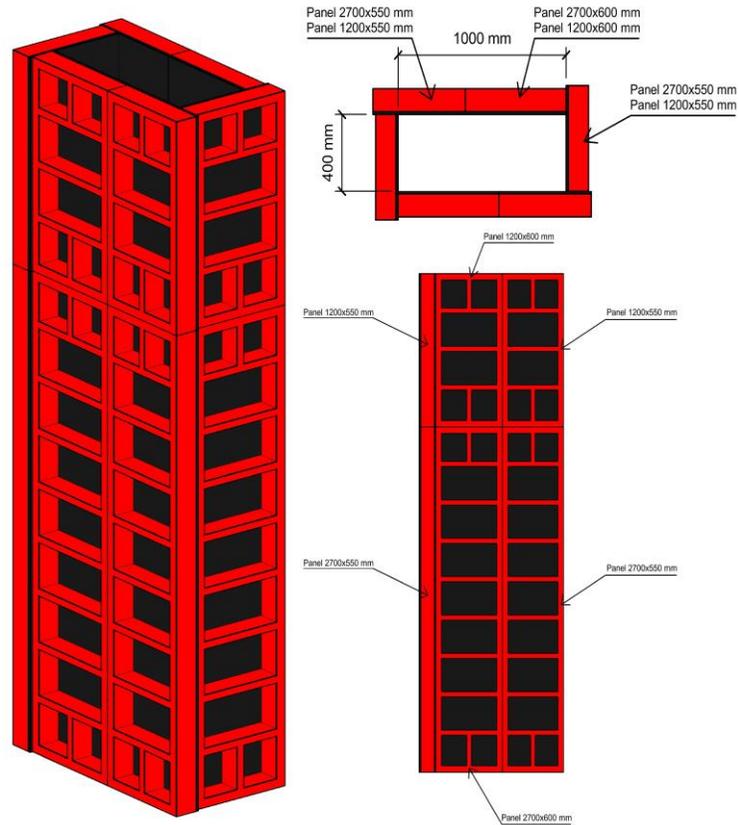


Figura 53. Vistas del conjunto de paneles para encofrar una columna de 400x1000 mm
Fuente: Elaboración propia

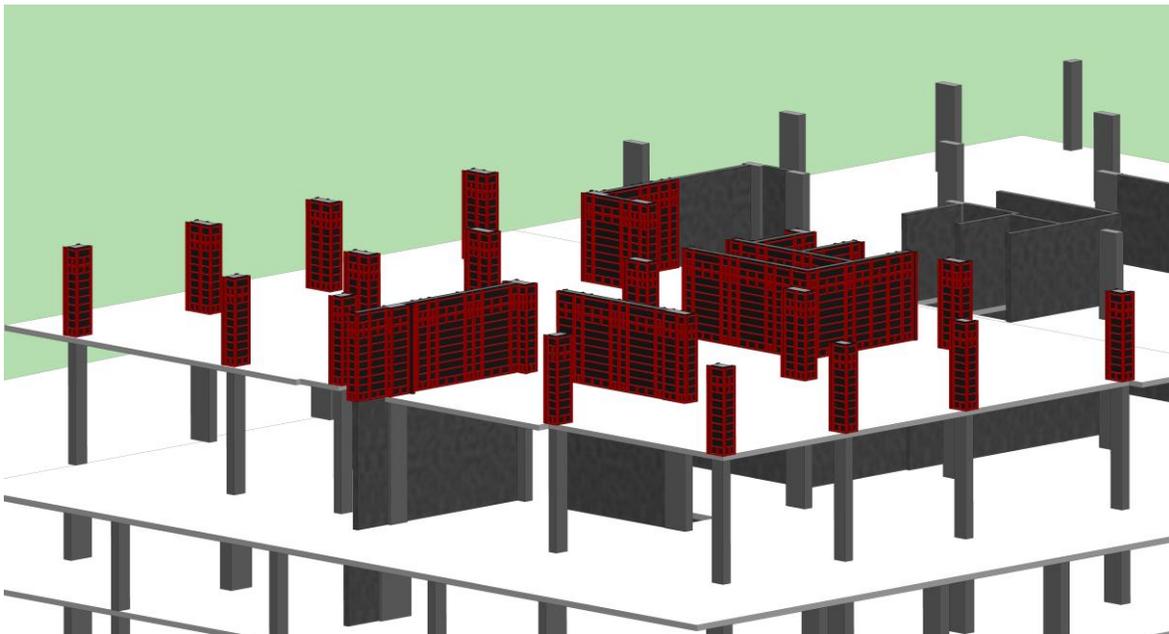


Figura 54. Vistas 3D de los encofrados para columnas y muros de la sección B del nivel 1
Fuente: Elaboración propia

Encofrados para entrepisos

El modelado de los encofrados para entrepisos también fue desarrollado a partir de la creación de familias en Revit, en base en el sistema de mesas TOPFLEX del proveedor Aluma System. Se partió de 2 dimensiones para mesas, las cuales fueron de 5.50m x 3.65m y de 2.50m x 4.90m, con paneles de plywood de 1.22m x 2.44m de 18mm de grosor. Con base en estas medidas se fueron ajustando diferentes dimensiones de mesas para que pudieran colocarse de forma correcta en los niveles. Las figuras 53, 54, 55 y 56 muestran el modelado y las vistas de este tipo de mesas con dimensiones de 5.50m x 6.65m. Además, la figura 57 muestra el modelado 3D de esta mesa de referencia, pero apoyada sobre andamios de carga para los pisos con alturas mayores.

Como se mencionó, las dimensiones de las mesas fueron variando conforme se iban realizando las modulaciones de los entrepisos a partir de diferentes láminas de Plywood mostradas en el cuadro 11. Por ello, en el cuadro 12 se muestran las dimensiones de las mesas que se utilizaron, así como el área que abarcan.

Cuadro 11. Dimensiones y áreas de las láminas de Plywood utilizadas en el proyecto

ID	Dimensiones de la lámina	Área (m ²)
1	2.44x1.22 m	2.98
2	2.44x0.61 m	1.49
3	1.22x1.22 m	1.49
4	1.22x0.61 m	0.74
5	0.61x0.61 m	0.37

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 12. Dimensiones y áreas de las mesas voladoras utilizadas en el proyecto

ID	Dimensiones de la mesa	Área (m ²)
1	5.50X3.65 m	20.08
2	5.50X3.05 m	16.78
3	5.50X2.44 m	13.42
4	5.50X1.83 m	10.06
5	5.50x1.22 m	6.71
6	5.50x0.61 m	3.36
7	3.65x3.05 m	11.13
8	3.65x2.44 m	8.91
9	3.65x1.83 m	6.68
10	3.65x1.22 m	4.45
11	3.05x3.05 m	9.30
12	3.05x2.44 m	7.44
13	3.05x1.83 m	5.58
14	3.05x1.22 m	3.72
15	3.05x0.61 m	1.86
16	2.44x2.44 m	5.95
17	2.44x1.83 m	4.46
18	2.44x1.22 m	2.98
19	2.44x0.61 m	1.49
20	1.83x1.83 m	3.35
21	1.83x1.22 m	2.23
22	1.83x0.61 m	1.12
23	1.22x1.22 m	1.49

Fuente: Elaboración propia

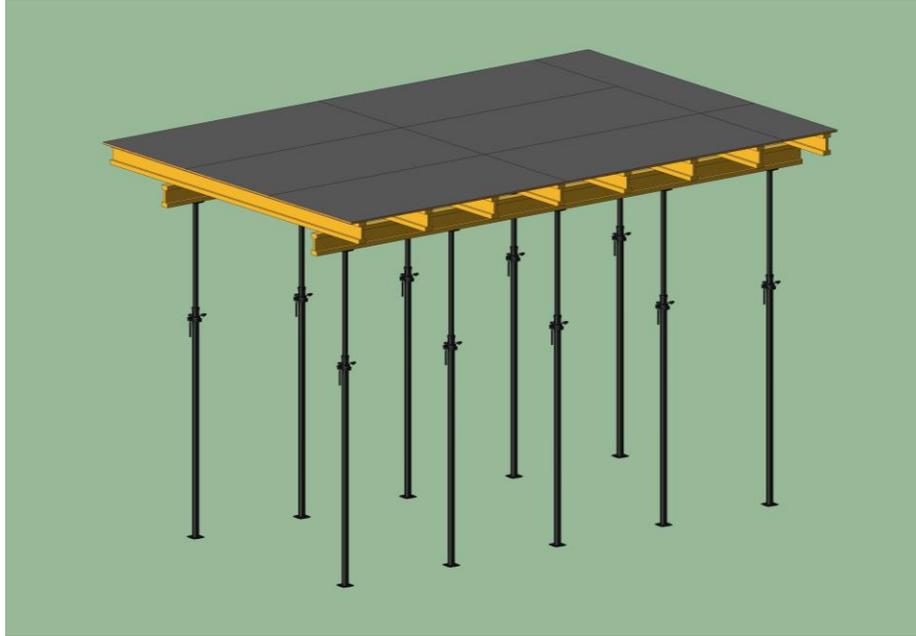


Figura 55. Vista 3D de la mesa de 5.50m x 3.65m del sistema Topflex
Fuente: Elaboración propia a partir de dimensiones de Aluma Systems

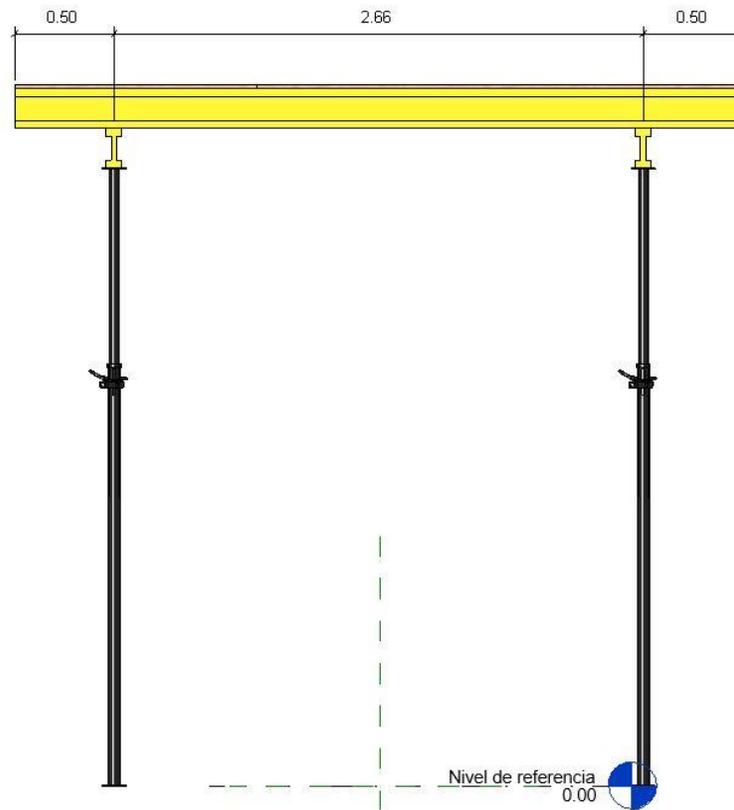


Figura 56. Vista lateral de la mesa de 5.50m x 3.65m del sistema Topflex
Fuente: Elaboración propia a partir de dimensiones de Aluma Systems

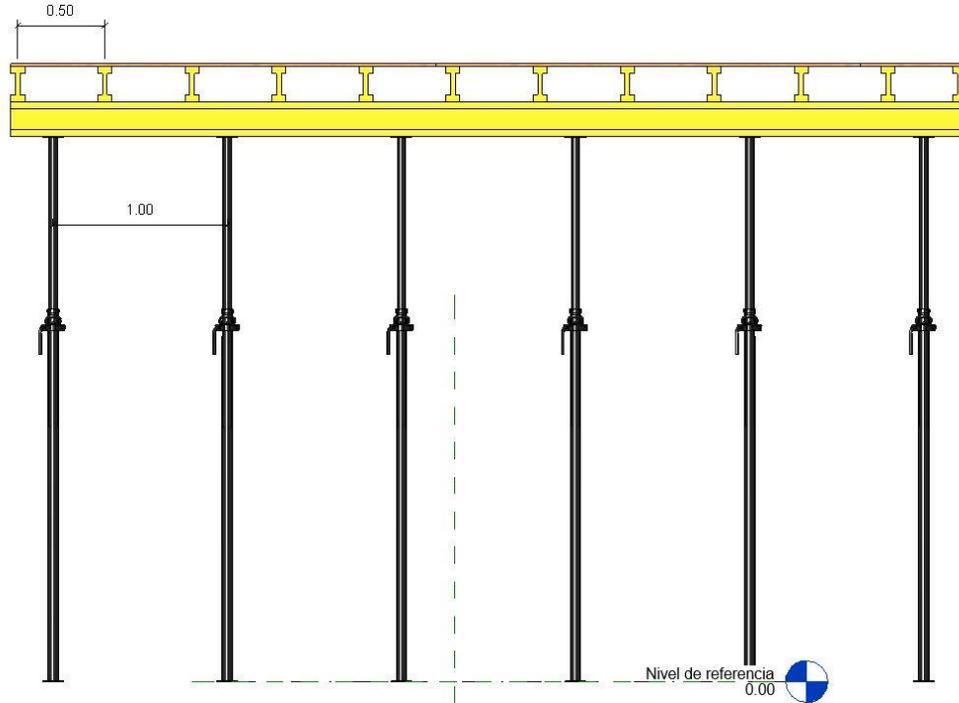


Figura 57. Vista frontal de la mesa de 5.50m x 3.65m del sistema Topflex
 Fuente: Elaboración propia a partir de dimensiones de Aluma Systems

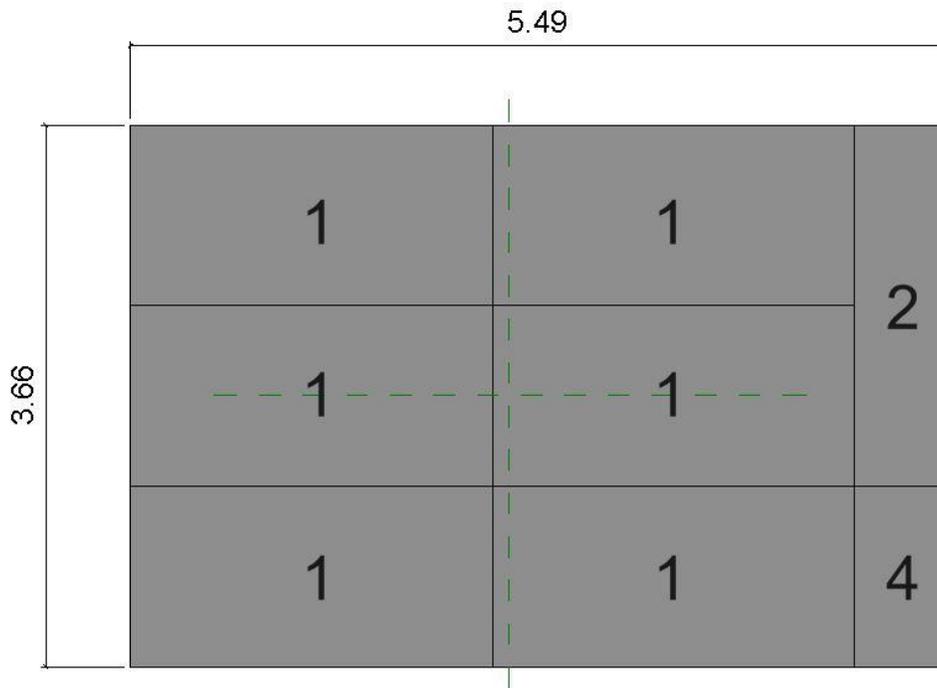


Figura 58. Vista superior de la mesa de 5.50m x 3.65m del sistema Topflex
 Fuente: Elaboración propia a partir de dimensiones de Aluma System

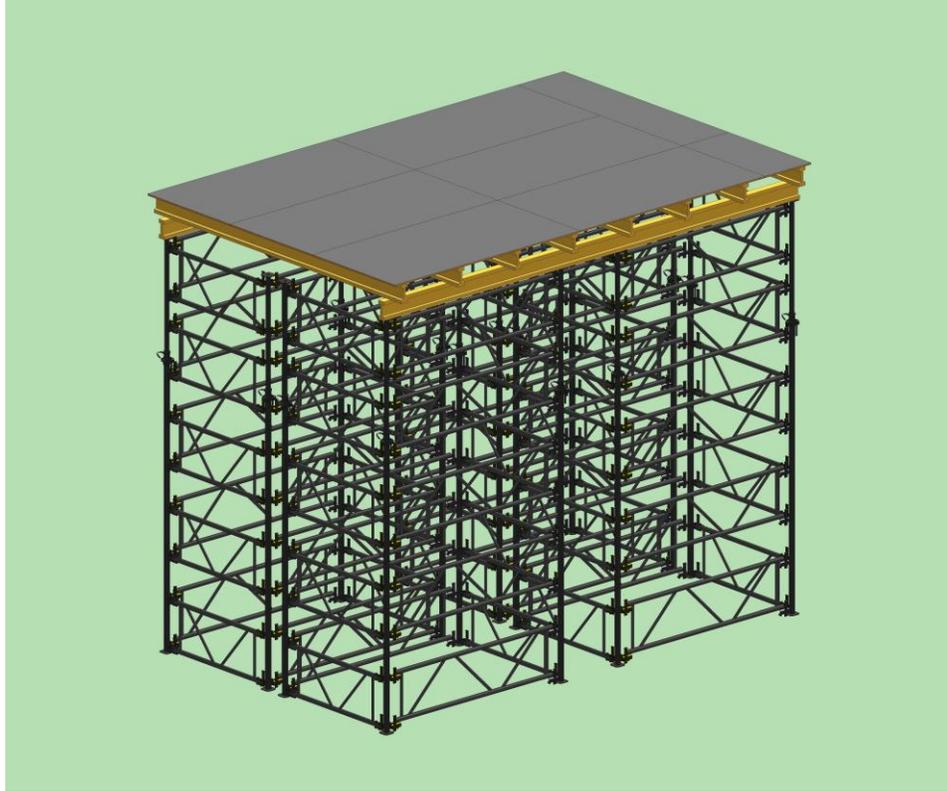


Figura 59. Vista 3D de la mesa de 5.50m x 3.65m del sistema Topflex con andamios de carga
Fuente: Elaboración propia a partir de dimensiones de Aluma System

Además, para poder completar los espacios donde no se podían colocar las mesas voladoras, se colocaron completamientos de madera como lo presentado ~~vemos~~ en la figura 58.

Ya teniendo las mesas y los completamientos en su lugar, se generaron planos para cada nivel de entresijos con las modulaciones para el encofrado de estos elementos, los cuales se encuentran en la sección de apéndices. La figura 60 muestra el modelado 3D del conjunto de encofrados utilizados para la chorrea de la sección A del nivel 2.

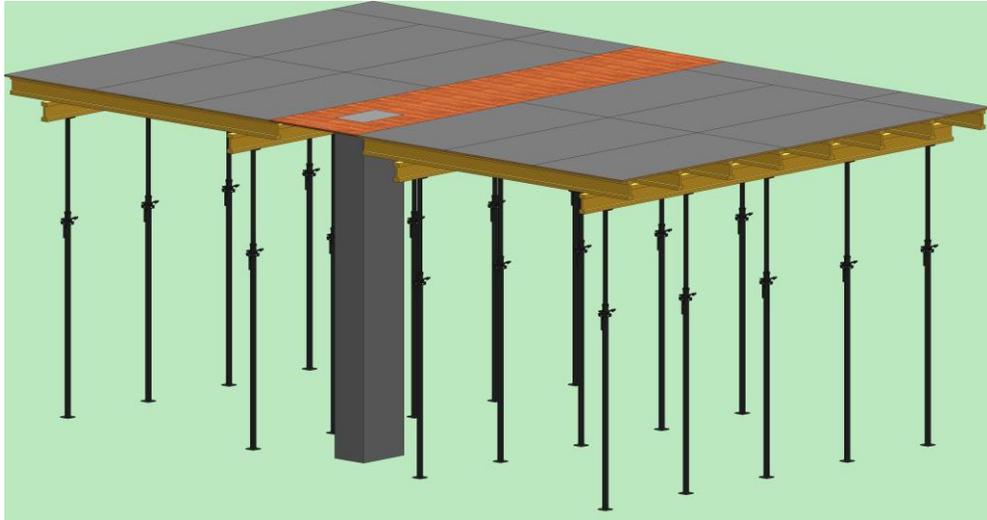


Figura 60. Vista 3D de los completamientos utilizados en los encofrados para entepiso
Fuente: Elaboración propia

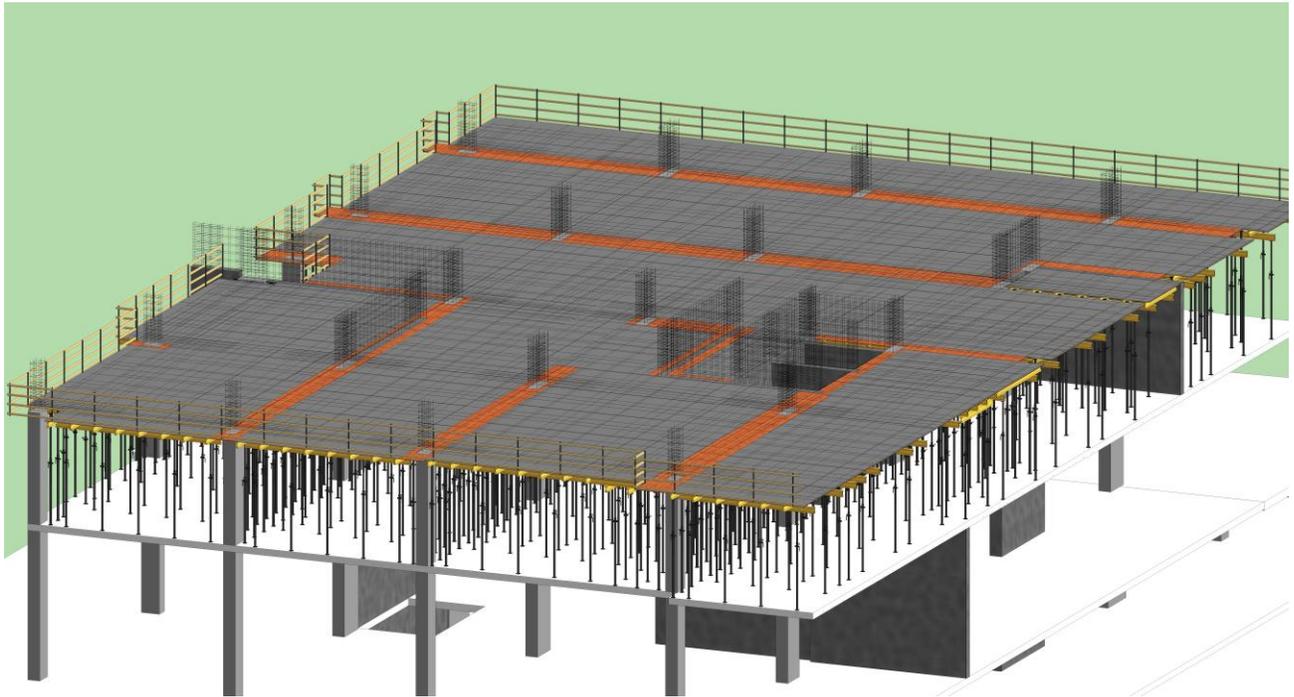


Figura 61. Vista 3D del encofrado para la construcción de la sección A del entepiso del nivel 2
Fuente: Elaboración propia

Modelos 4D y 5D

El modelo 3D y el cronograma generado, son exportados al software Navisworks como se ve en la figura 60.

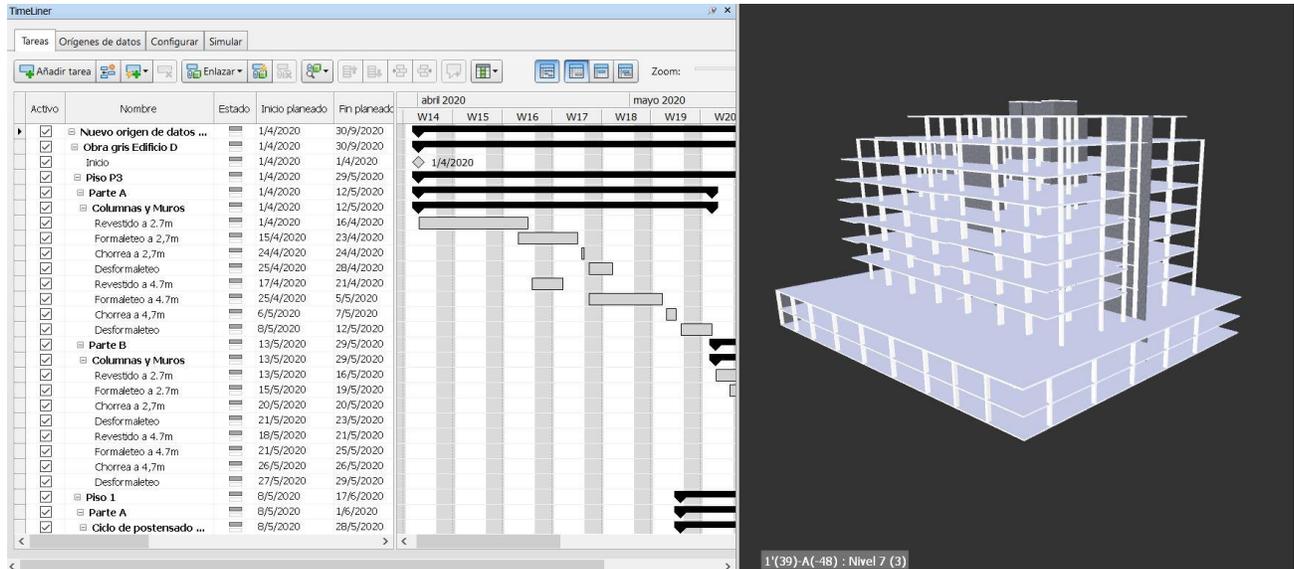


Figura 62. Vista del modelo 3D y del cronograma en Navisworks
Fuente: Elaboración propia

Ya teniendo estos 2 archivos en Navisworks se realiza la coordinación, la cual es desarrollada al crear sets de selección de los diferentes elementos contenidos en el modelo 3D, tal y como se ve en la figura 61.

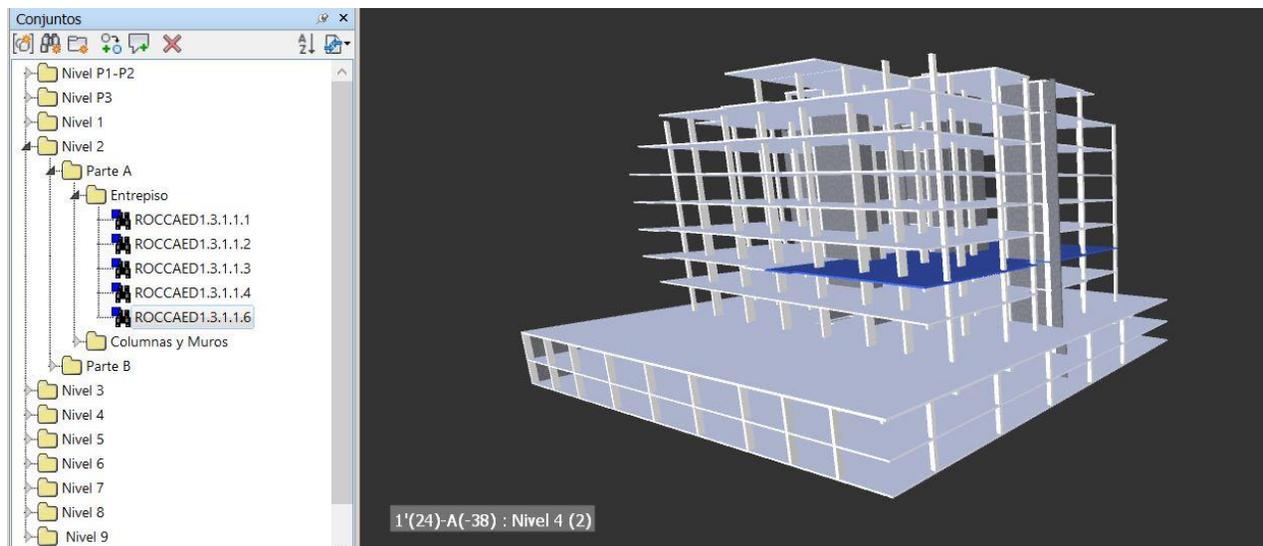


Figura 63. Sets de selección creados en Navisworks
Fuente: Elaboración propia

Estos sets de selección se enlazan al cronograma generando la coordinación, como se ve en la figura 62.

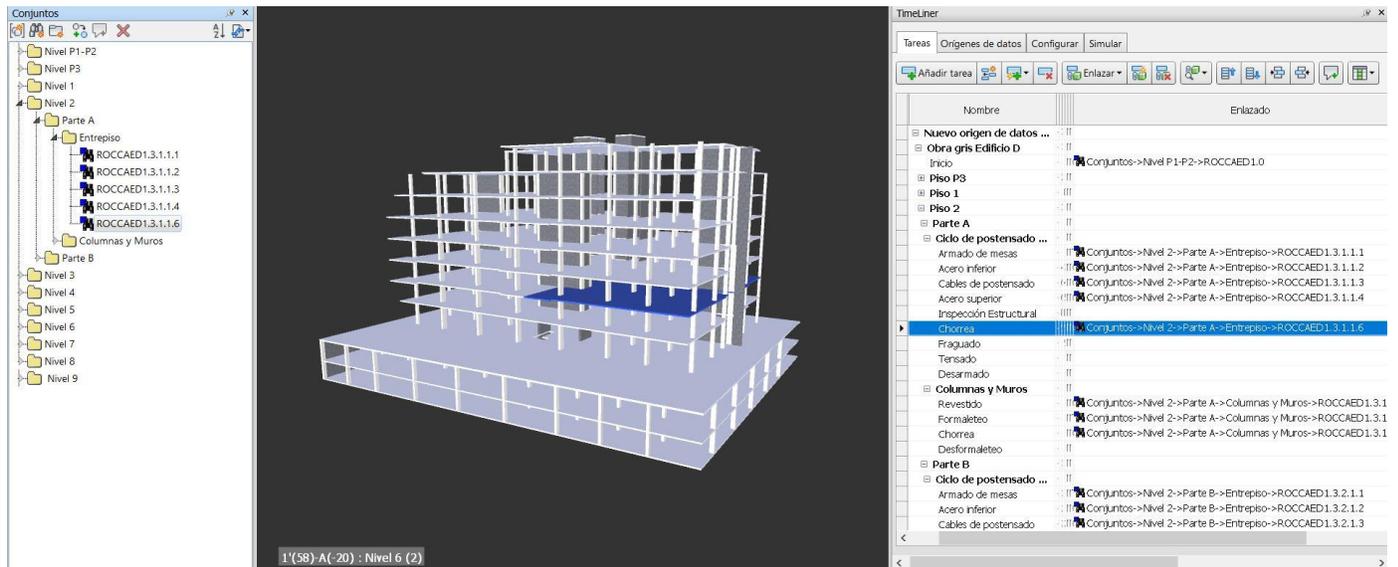


Figura 64. Sets de selección enlazados con el cronograma
Fuente: Elaboración propia

En la simulación, los elementos permanentes (columnas, muros y entrepisos) son presentados de color verde durante el inicio de su construcción y los elementos temporales (encofrados) son presentados con color rojo, tal y como vemos en las figuras 63 y 64 respectivamente.

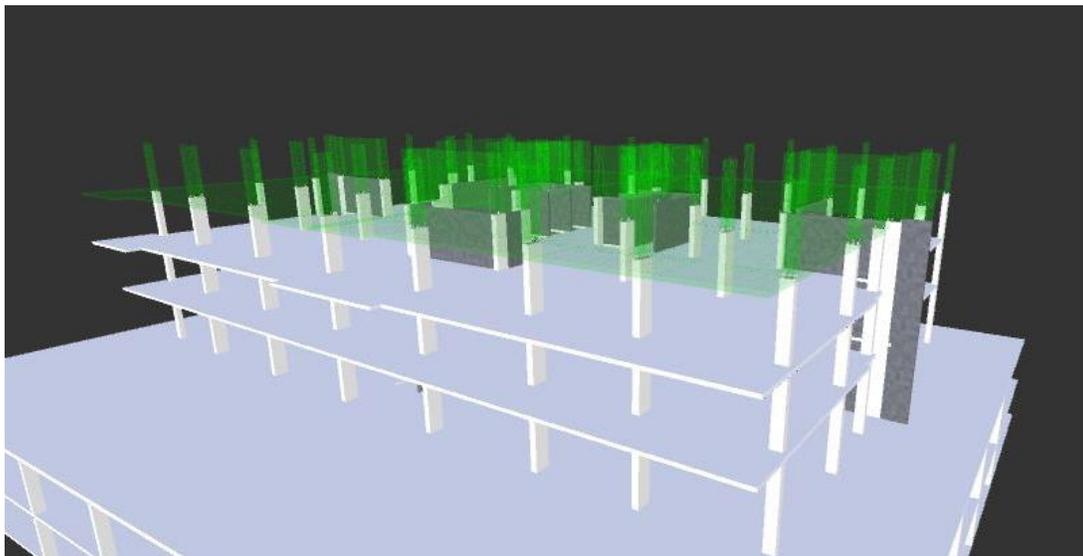


Figura 65. Estatus de los elementos constructivos permanentes
Fuente: Elaboración propia

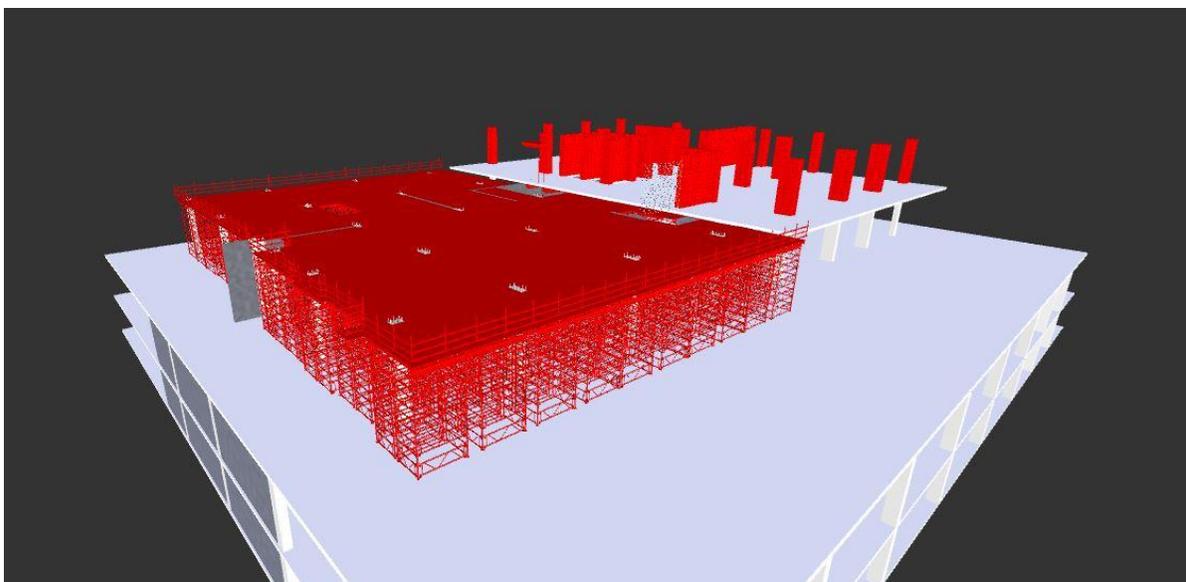


Figura 66. Estatus de los elementos constructivos temporales
Fuente: Elaboración propia

La coordinación permite generar la simulación 4D y 5D, la cual es adjuntada a este trabajo en formato de video AVI.

Gestión de la calidad

Para el logro de este objetivo fue necesario desarrollar representaciones gráficas que permitieran una mejor comprensión de las actividades ligadas a la construcción de entresijos, muros y columnas. Una de las representaciones gráficas utilizadas fueron los diagramas de causa-efecto o diagramas de Ishikawa, los cuales son presentados en la figura 65 para el caso de los entresijos y en la figura 66 para el caso de las columnas y muros.

Además de los diagramas de Ishikawa, fueron generados diagramas de flujo para cada una de las actividades necesarias para la construcción de los entresijos, muros y columnas. La figura 67 muestra el diagrama de flujo del colocado del acero superior e inferior en los entresijos y la figura 68 muestra el diagrama de flujo de la actividad de formateo de columnas y muros. Los diagramas de las demás actividades se presentan en la sección de apéndices.

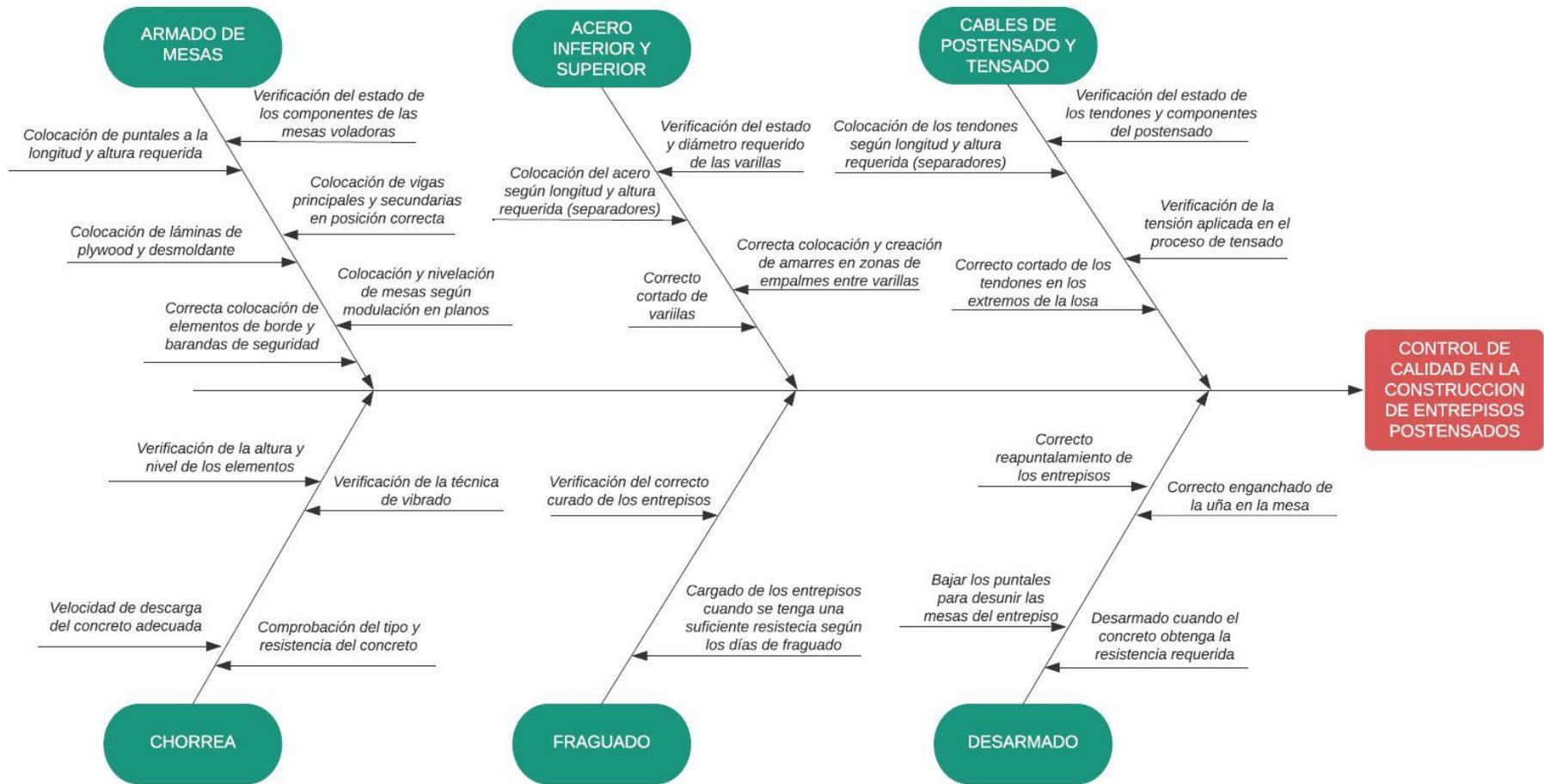


Figura 67. Diagrama de Causa-Efecto de la construcción de entresijos en el proyecto
Fuente: Elaboración propia

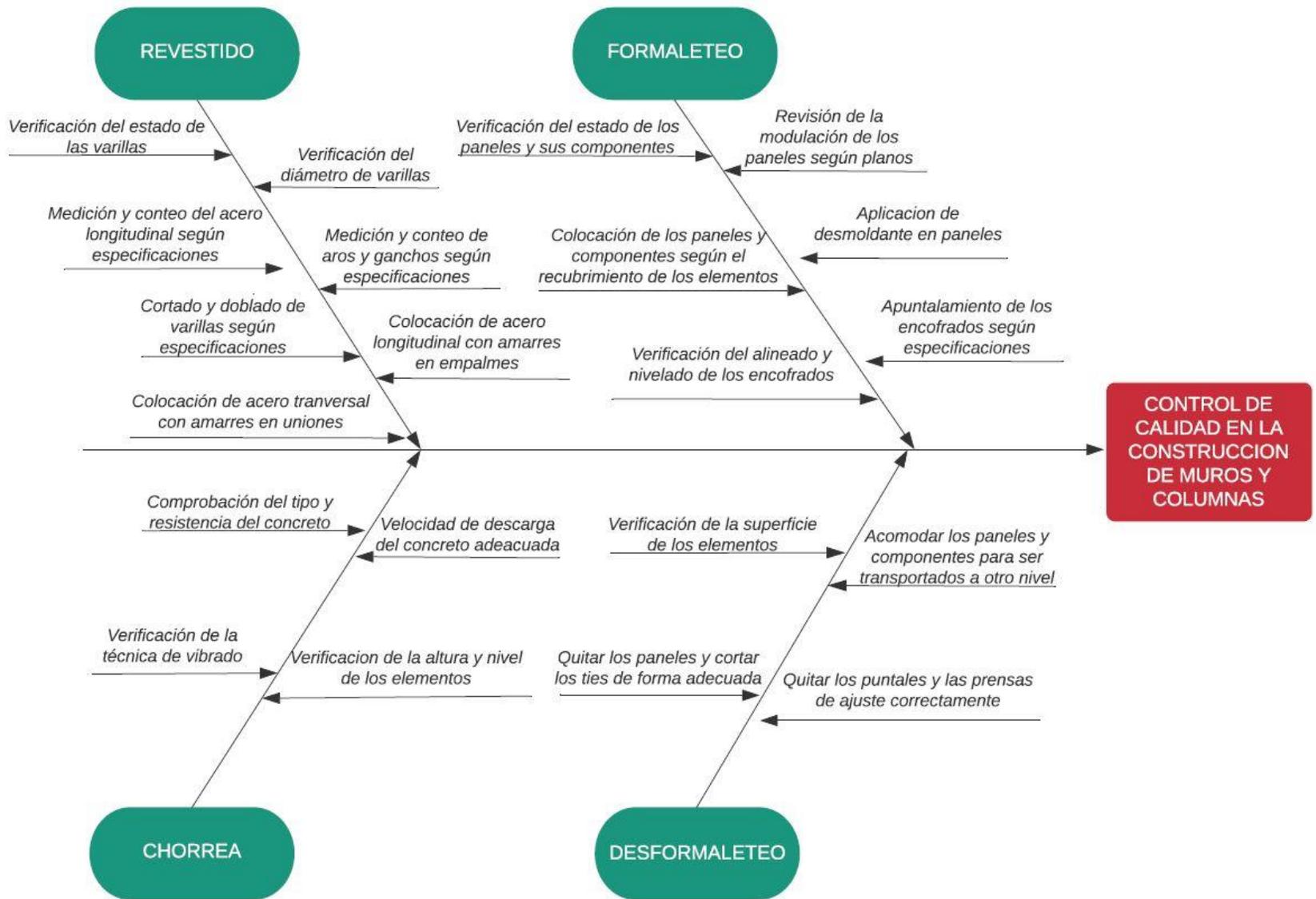


Figura 68. Diagrama de Causa-Efecto de la construcción de columnas y muros en el proyecto
Fuente: Elaboración propia

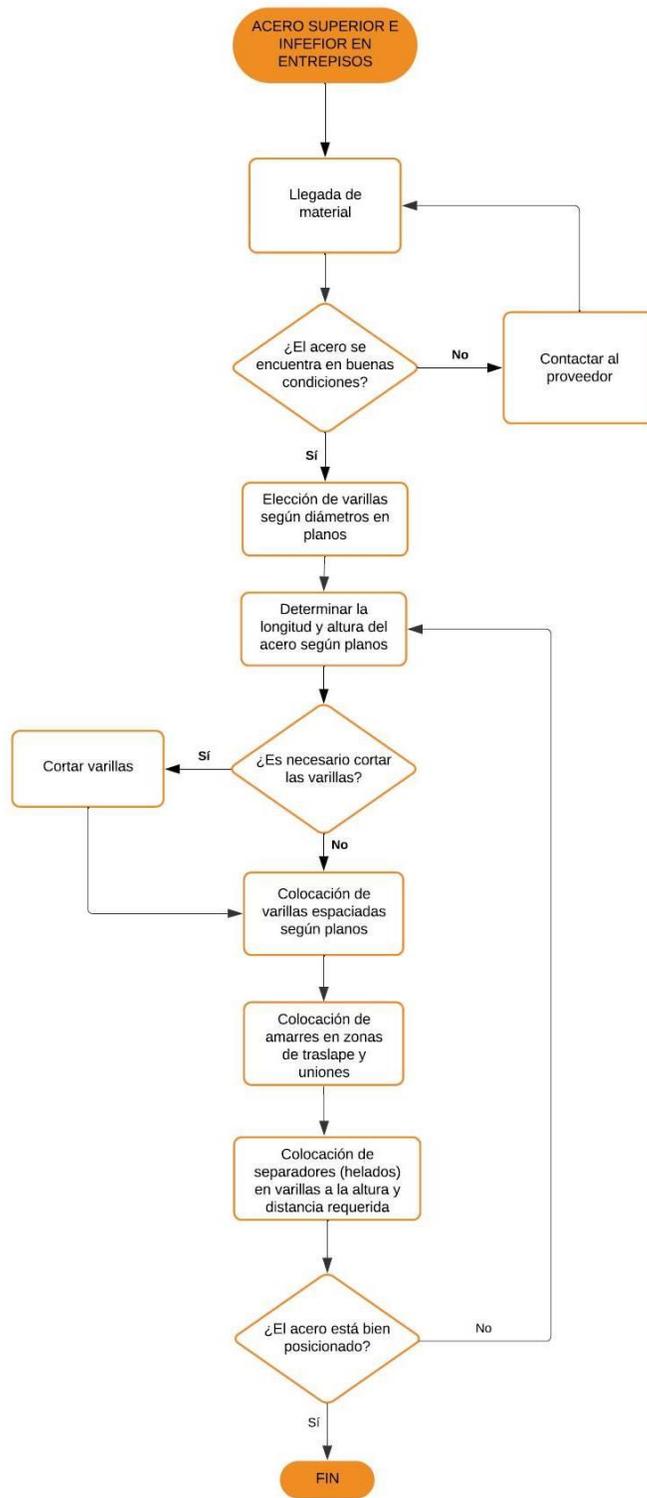


Figura 69. Diagrama de flujo del colocado del acero superior e inferior en entresijos
Fuente: Elaboración propia

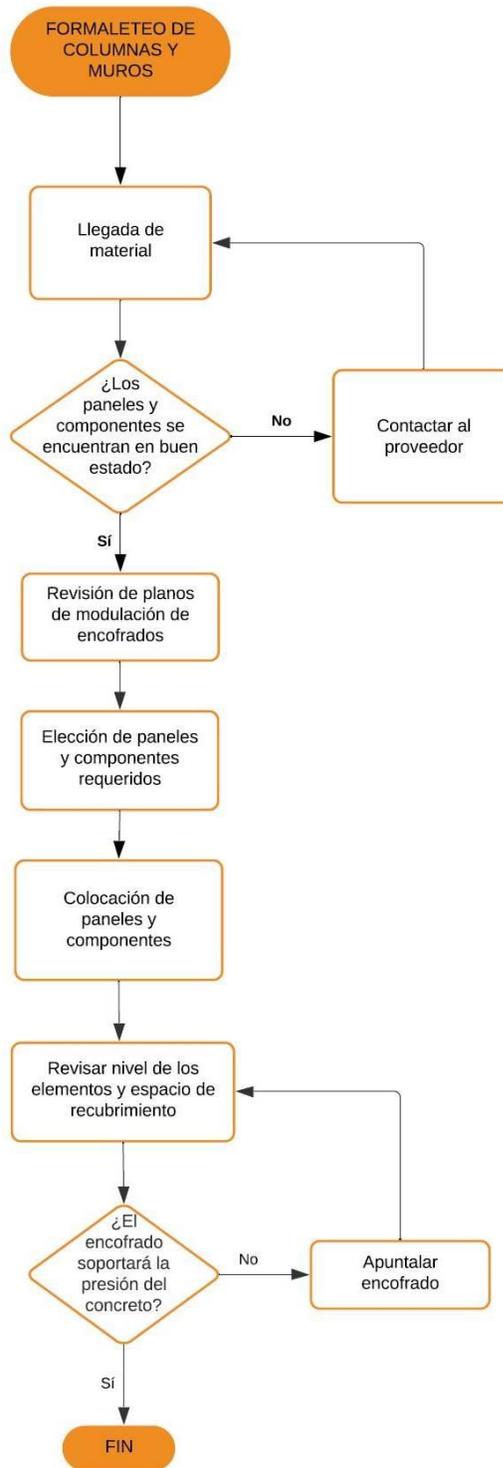


Figura 70. Diagrama de flujo del formateo de columnas y muros
Fuente: Elaboración propia

Con los datos proporcionados con los diagramas de flujo y de Ishikawa, se procedió a realizar las plantillas de gestión de la calidad con la utilización de macros en el programa Excel. Estas plantillas incluyen una hoja de inicio como se puede ver en la figura 69, de donde se accede a las hojas de control de calidad de cada actividad (ver figura 70), hojas donde están colocados los diagramas de Ishikawa y de flujo, y además una hoja donde se guardan los datos provenientes de las hojas de control de calidad.



Figura 71. Interfaz de inicio del programa de gestión de calidad
Fuente: Elaboración propia



HOJA DE CONTROL DE CALIDAD DEL ARMADO DE MESAS PARA ENTREPISOS

Aspectos generales

Profesional a cargo: Fecha:
Nivel: Sección:

Control de Calidad

Responda a las preguntas marcando con un **Sí** o un **No** en la respectiva casilla y brinde una calificación del **1 al 5**, donde: **1 = Muy Malo**, **2 = Malo**, **3 = Regular**, **4 = Bueno**, **5 = Muy Bueno**. Luego el sistema proporcionará una calificación promediada y con base en este dato, determinará si la ejecución de la tarea fue: **Muy Mala**, **Mala**, **Regular**, **Buena**, **Muy Buena**.

Preguntas	Respuesta	Calificación
1) ¿Los componentes para el armado de mesas se encuentran en buen estado?	<input type="text"/>	<input type="text"/>
2) ¿Los puntales y horquillas se encuentran a la altura y posición requerida?	<input type="text"/>	<input type="text"/>
3) ¿Las vigas principales fueron colocadas en la posición y a la separación requerida?	<input type="text"/>	<input type="text"/>
4) ¿Las vigas secundarias fueron colocadas en la posición y a la separación requerida?	<input type="text"/>	<input type="text"/>
5) ¿Las láminas de Plywood se encuentran en la posición requerida?	<input type="text"/>	<input type="text"/>
6) ¿Se colocó desencofrante sobre las láminas de Plywood?	<input type="text"/>	<input type="text"/>
7) ¿Las mesas se encuentran niveladas?	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Calificación promediada:	<input type="text" value="0"/>	Total: <input type="text" value="0"/>
Ejecución de la tarea:	<input type="text"/>	

Observaciones:

Exportar a PDF

Guardar

Limpiar

Salir

Figura 72. Hoja de Excel para el control de calidad de el armado de mesas para entrespisos
Fuente: Elaboración propia

Análisis de Resultados

Análisis de los sistemas de encofrado

Para el desarrollo de este primer objetivo, se realizaron varias entrevistas al ingeniero de la empresa ROCCA Development Group y a los proveedores de encofrados. Como se mencionó en la sección de resultados, estas entrevistas se encuentran en la sección de apéndices y sus resultados serán analizados en los siguientes párrafos.

Edificio C

Este proyecto corresponde a un edificio ubicado en Santa Ana y se encuentra a un lado del edificio D. La elección de este edificio como base para el desarrollo de los demás objetivos relacionados al edificio D, surgió debido a la similitud que presentan ambos con respecto a la construcción de la obra gris (entrepisos, columnas y muros). Esta similitud abarca los sistemas constructivos empleados, la duración y secuencia de las actividades y los procesos necesarios para la construcción de los diferentes elementos estructurales.

Este edificio que consta de 10 niveles, donde se utilizaron losas planas lo cual permite entre muchas ventajas, tener alturas de pisos mayores. Estas losas fueron construidas mediante el método de postensado de entrepisos donde se utilizaron tendones desadheridos para los primeros 3 niveles y para los demás niveles tendones adheridos. El peralte de estos entrepisos va desde los 40 cm en los niveles de parqueo, a los 21 cm en los niveles superiores, esto debido a que los primeros entrepisos son los que más carga van a soportar.

Para este edificio, los entrepisos fueron construidos a partir del sistema de mesas voladoras llamado Aluma Frame. Estas mesas permitieron soportar cargas muy altas, un acabado final muy bueno y el armado y la transportación entre niveles, fue fácil con la ayuda de la grúa torre.

Las columnas y muros fueron construidos con concreto reforzado. El encofrado utilizado para estos elementos fue el sistema RASTO-TAKKO, el cual es un sistema de paneles de aluminio que permitió soportar las presiones del concreto y que, debido a su peso, permitió un fácil transporte entre el mismo nivel o niveles posteriores.

En el caso de la construcción de entrepisos, se siguió el ciclo que se muestra en la figura 29, donde se identificaron 9 actividades ordenadas secuencialmente y que se desarrollan en el sentido de las agujas del reloj, iniciando por la actividad del armado de mesas. La lista y la duración de cada una de las actividades de este ciclo se presentan en el cronograma mostrado en la figura 31. La duración total de este ciclo fue de 13 días y esto se debe a que las actividades se debían de desarrollar de forma traslapada, o sea, mientras se estaba realizando alguna actividad en específico, se podía iniciar con otra, de tal forma que se aprovechara el tiempo y que los trabajadores siempre estuvieran trabajando.

También se utilizó un ciclo para la construcción de columnas y muros, el cual se muestra en la figura 30. En este ciclo se identifican 4 actividades ordenadas de forma secuencial iniciando con la actividad de revestido. En el cronograma de la figura 31, además de mostrarse las actividades del ciclo de postensado de entrepisos, se muestran también las actividades del ciclo de construcción de columnas y muros, donde se puede ver que las actividades también son desarrolladas de forma traslapada y que se inician a partir de la dependencia entre la chorrera del entrepiso y el revestido de las columnas y muros. Este ciclo tuvo una duración total de 7 días.

Es importante destacar que la construcción de la obra gris de cada nivel se dividió en 2 secciones, la A y la B. Por lo tanto, los ciclos mostrados antes solamente corresponden a la construcción de una de estas secciones. La duración total de cada sección es de aproximadamente 15 días y se dice que es

aproximado, porque existieron variables que ampliaban o acortaban el tiempo según el horario de trabajo. Además, si el chorreado de los elementos se realizaba el viernes, permitía que la mayor parte de los días del fraguado se dieran en días donde no se trabaja a jornada completa como los sábados o no se trabajaba del todo como los domingos, lo cual generaba un acortamiento del tiempo en comparación si esta actividad se desarrollara en días laborables. También es importante recalcar que la duración de estos ciclos se puede ver modificada por la cantidad y tamaño de los elementos de cada nivel, es por ello que estos valores son tomados como referencia para el desarrollo del planeamiento de las actividades del edificio D, partiendo del hecho de que estos ciclos correspondieron a una altura de piso igual para ambos edificios.

Edificio D

Este proyecto corresponde a un edificio que se construirá a la par del edificio C en Santa Ana y con respecto al cual se desarrolló este proyecto. Se compone de 11 niveles distribuidos en el cuadro 5 donde también se muestra el área de los entresijos, la altura y la ubicación de cada uno de estos niveles.

Para poder tener diferentes tipos de encofrados se entrevistaron a 4 proveedores, los cuales mostraron 6 tipos diferentes de sistemas de encofrados para entresijos. El cuadro 6 muestra las principales características de estos sistemas, donde se puede destacar que todos los sistemas a excepción de uno se componen de una estructura de vigas soportadas por puntales de acero o por andamios de carga. En cuanto al material de construcción de las vigas, solo el sistema ALUMA Frame del proveedor ALUMA está compuesto por vigas de aluminio, los demás sistemas se componen de vigas de madera. El único sistema que presentó una estructura diferente fue el sistema Rapideck del proveedor FYPSA, el cual se compone de paneles de aluminio soportados por puntales y cerchas de acero.

Siguiendo con el cuadro 6, el precio de alquiler por m² mensual de estos sistemas fue variado, siendo el sistema TOPFLEX del proveedor ALUMA con un precio de \$6.00, el que presentó el menor precio y el sistema Rapideck del proveedor FYPSA con un precio de \$9.00, el

que presentó el precio más alto. Además, el rendimiento de colocación de estos sistemas fue de 600m²/día para todos los sistemas a excepción del sistema Rapideck que fue de 500m²/día. La disponibilidad fue otro aspecto importante a tomar en cuenta, donde a excepción del proveedor FYPSA, todos los demás proveedores daban la garantía de que la disponibilidad de sus sistemas era inmediata.

El cuadro 7 muestra las ventajas y desventajas de estos sistemas, las cuales fueron evaluadas para que, junto con el tiempo y el costo estimados en el siguiente objetivo, permitieran decidir cuál sistema se utilizará en la construcción del edificio D. Los criterios que se evaluaron en los sistemas fueron el armado y desarmado de sus componentes, la capacidad estructural y la movilización.

Para el encofrado de columnas y muros se eligió el RASTO-TAKKO de la empresa Aluma System el cual fue utilizado en el edificio C, lo cual facilitó la obtención de información y de referencias del sistema.

Determinación del tiempo de ejecución óptimo para la construcción de entresijos y columnas

Este objetivo fue desarrollado con la finalidad de utilizar los datos proporcionados tanto por los proveedores como por la empresa ROCCA, para que, junto con herramientas y técnicas de programación, realizar una optimización del tiempo de la ejecución de la obra gris del edificio D.

Primeramente, lo que se hizo fue comprender el ciclo de utilización de los encofrados de entresijo dentro de un proyecto. Los sistemas de encofrado analizados al

componerse de materiales muy resistentes permiten que se puedan usar una gran cantidad de veces y como en este tipo de edificios todos los entrepisos son construidos de la misma manera, el uso de estos sistemas es fundamental y permite analizar cual es la cantidad de recursos suficientes que deberán ser utilizados.

Para realizar este análisis de recursos, se crearon diferentes escenarios acerca de cómo van a circular los encofrados de entrepisos en los niveles del proyecto, a partir de una cantidad de recursos específica. En total se analizaron 3 escenarios distintos en los que se varió la cantidad de cuadrillas, entendiéndose como cuadrilla a la cantidad de recursos de encofrado necesario para abarcar un área de entrepiso de uno de los niveles del edificio. Los entrepisos del edificio D se dividieron en 2 secciones la A y la B, por lo tanto, cada cuadrilla abarcará la mitad de un entrepiso, las cuales fueron identificadas con un color en particular para cada escenario. El área de cada una de las secciones por nivel se muestra en el cuadro 10, donde se puede apreciar que todos los entrepisos se dividen en 2 secciones, a excepción del nivel 8, que debido a su tamaño solamente ocupará una cuadrilla de encofrado. Estas áreas no solamente son representaciones para el desarrollo de los escenarios, si no que esta es la forma en cómo se construyen los entrepisos y que además siguen un orden lógico constructivo, donde se comienza con la primera mitad de un entrepiso, se procede con la segunda y así sucesivamente hasta terminar en el último nivel. Es evidente que este orden lógico está ligado a los materiales con los que se construyen tanto los entrepisos como las columnas y los muros, ya que al final estos son los elementos que van a soportar las cargas. Como estos elementos son construidos con concreto, el colocado de encofrados y demás elementos sobre ellos, va a depender de la resistencia que hayan adquirido con el pasar de los días.

El primer escenario corresponde a la utilización de 3 cuadrillas de encofrado, las cuales corresponden a abarcar un piso y medio del edificio. En el segundo escenario se utilizan 2 cuadrillas de encofrado, las cuales equivalen a abarcar 1 piso completo del edificio. Y en el tercer y último escenario se utiliza solamente una cuadrilla de encofrado, lo que equivale a abarcar solamente medio piso. Las figuras 32, 33 y 34 muestran la distribución de las cuadrillas para el

primer, segundo y tercer escenario respectivamente.

Se procedió a realizar los cronogramas del proyecto, los cuales son desarrollados a partir de la experiencia del edificio C, los sistemas de encofrado de entrepiso y de los escenarios analizados. La duración y precedencias de estas actividades se muestran en la figura 31. Además de las precedencias mostradas se añadió otra precedencia para el caso de la actividad del armado de mesas, ya que su inicio va a depender de la finalización de la chorrea de las columnas del nivel sobre el cual se colocarán estos elementos y también del desarmado de las mesas de la cuadrilla correspondiente, siguiendo la distribución mostrada en cada escenario.

Todos estos aspectos fueron creados para cada nivel, donde se fue modificando el precio de cada sistema y también la distribución de las cuadrillas según el escenario. Otro aspecto importante que se tomó en cuenta fue el rendimiento de colocación de cada sistema de encofrado, el cual repercute en la duración de las actividades de armado de mesas y de desarmado de mesas.

El cuadro 9 muestra todas las iteraciones que se realizaron para cada sistema de encofrado de entrepisos según la distribución de cuadrillas. De este cuadro se puede inferir que la iteración más económica fue el utilizar 3 cuadrillas del sistema TOPFLEX del proveedor ALUMA, al obtener un valor de \$721 823.41 y una duración de 4.8 meses, mientras que la iteración que obtuvo menos duración fue el utilizar 3 cuadrillas del sistema Rapideck del proveedor FYPSA, al obtener un valor de \$690 122.21 y una duración de 4.7 meses. A partir de estos resultados, se tomó la decisión de utilizar el sistema TOPFLEX del proveedor ALUMA System y la razón de esta escogencia radica en que es un sistema que ha sido utilizado por la empresa en proyectos anteriores lo cual garantiza su experiencia, además que fue el sistema con el precio más competitivo y que tienen disponibilidad inmediata.

Para el caso de los encofrados de las columnas y muros, se eligió el sistema RASTO-TAKKO de Aluma System. Este sistema fue el único del cual se tenía alguna referencia ya que se presentaron problemas para obtener información del precio de alquiler de otros sistemas y como fue utilizado por la empresa

ROCCA en el edificio C, se determinó que será el utilizado para realizar este proyecto.

Modelos 3D, 4D y 5D

Ya teniendo definido cuáles son los sistemas de encofrado a utilizar y el cronograma correspondiente, se procedió a elaborar los modelos 3D, 4D y 5D.

Modelo 3D

El modelado de los elementos se realizó en el programa Revit, en el que a partir de los planos y las especificaciones requeridas se fueron modelando cada uno de los elementos estructurales seleccionados. Se escalaron en AutoCAD y exportaron a Revit un total de 35 planos, de los cuales 15 corresponden a los planos de entresijos, 10 a los planos de los cables de postensado tanto concentrados como distribuidos, 5 a los planos de los bastones superiores y los restantes 5 a los planos de los bastones inferiores. Es importante recalcar que los primeros 3 niveles del edificio destinados a parqueos ya están construidos, pero para lograr visualizar la totalidad del edificio, se exportaron los planos de entresijos de estos niveles, pero teniendo claro que el enfoque del proyecto va hacia los niveles que no han sido construidos que son los restantes 8, para los cuales si fueron exportados y ubicados todos los planos de los elementos estructurales.

Antes de exportar los planos a Revit, se procedió a preparar el espacio de trabajo, donde a partir de las alturas proporcionadas en los mismos planos, se colocaron las líneas de referencia de los niveles correspondientes, como lo vimos en la figura 36. Los primeros 3 niveles fueron identificados en el programa como P1, P2 y P3, y a partir del siguiente nivel se colocó un número secuencial hasta llegar al nivel 8. Luego se exportó el plano del nivel P1, sobre el cual se dibujó la grilla de ejes tanto en X como en Y, cómo se puede ver en la figura 35, y ya con esto el programa replicaba esta grilla para todos los niveles creados.

Para el modelado de los elementos estructurales de concreto se utilizaron las familias precargadas de Revit, donde los entresijos fueron modelados como suelos estructurales, las columnas como pilares estructurales de hormigón y los muros como muros estructurales.

Todo este proceso de modelación de la estructura de concreto de los elementos fue replicado para todos los niveles del edificio como se ve en la figura 49, pero para el caso del acero de refuerzo este fue modelado a partir de los elementos que estaban por arriba del entresijo del nivel P3, los cuales como se dijo anteriormente, son los que no se han construido.

Con respecto a los niveles del 1 al 8, se modelaron 2 tipos de entresijos denominados L6 y L7 según los planos, los cuales tienen un peralte de 21cm y de 25cm respectivamente.

La modelación del acero en entresijos se realizó con la colocación de las mallas inferiores, las cuales fueron creadas con varillas #4 y espaciadas a cada 800mm. Esta malla fue colocada en los entresijos de los niveles del 1 al 8, ya que como se mencionó anteriormente, solo se contaban con 2 tipos de entresijo y estos presentaban la misma configuración de acero para la malla inferior. También fueron modelados los bastones inferiores y superiores, los cuales presentaban configuraciones tanto de espaciamiento como de números de varillas muy variados.

Ya teniendo el acero inferior y superior en los entresijos, se procedió a modelar los cables de postensado. Estos fueron modelados en Revit como barras de acero con un diámetro de 12.7mm según las notas y detalles del postensado. Se modelaron 2 tipos de cables de postensado, los distribuidos y los concentrados. Los distribuidos corresponden a los cables que van espaciados a lo largo de todo el ancho de los entresijos y fueron identificados con el color azul, y los concentrados corresponden a los cables que también se colocan espaciados, pero en zonas específicas del entresijo y fueron identificados con el color rojo, como se puede observar en la figura 42.

Se modelaron un total de 6 tipos diferentes de columnas, las cuales pueden verse en la sección de resultados del modelado 3D de columnas y también en la de apéndices. Todos estos tipos de columnas presentaban dimensiones variadas, así como también el acero transversal y el longitudinal. Las columnas

ubicadas sobre el tercer entrepiso tuvieron una altura de 4.7m y para el resto de los niveles de 3.75m. Además, estas fueron colocadas de tal forma que tuvieran continuidad en todos los niveles, donde el acero longitudinal pasa de las columnas de un nivel al otro y evidentemente sobre los entrepisos.

En el caso de los muros se modelaron 15 tipos diferentes, los cuales poseen anchos que van desde los 20cm hasta los 40cm. El acero de refuerzo transversal y longitudinal variaba para cada tipo, como lo podemos en la figura 46 y en la sección de apéndices. En los casos en los que se tenía muros y columnas juntas, los aros de confinamiento quedaron inmersos en ambos elementos, para generar la unión entre ellos. Esto mismo se reprodujo para el acero longitudinal, donde las varillas pasaban hasta los siguientes niveles para generar la unión entre los entrepisos y los muros.

Ya teniendo todos los elementos modelados, se siguió con el modelado de los encofrados para columnas, muros y entrepisos.

El sistema elegido para encofrar los muros y columnas como se mencionó anteriormente corresponde al sistema RASTO-TAKKO de la empresa Aluma System. Este sistema de paneles se compone de marcos de aluminio de 12cm de espesor y recubiertos en una cara del panel con láminas de plywood de 14mm de espesor. Se crearon paneles según las dimensiones mostradas en el catálogo de este sistema, donde se tienen paneles con alturas de 1.2m, 1.5m, 2.7m y 3.0m, y anchos de 0.3m, 0.45m, 0.55m, 0.60m, 0.75m, 0.9m y 2.4m. A partir de estas configuraciones de paneles y teniendo las medidas de las columnas y muros de cada nivel, se procedió a crear familias que pudieran encofrar estos elementos. Para los niveles con alturas de 3.75m, se utilizaron paneles de 2.7m de altura y sobre estos se colocaron paneles de 1.2m para obtener una altura total de 3.9m. Para el nivel P3 el cual tiene una altura de 4.7m, se combinaron paneles de 2.7m y sobre estos 2 paneles de 1.2m de alto, para sumar una altura total de 5.1m. Estas combinaciones de paneles fueron elegidas debido a que eran las que más se acercaban a la altura de los niveles. Para el caso de los muros, en ciertos casos los paneles no calzaban con las dimensiones, por lo tanto, se utilizaron completamientos de madera que lograran encofrar todo el elemento.

Seguidamente del modelado de los encofrados para columnas y muros, se procedió a modelar los encofrados para entrepisos. Como se mencionó, el sistema elegido para encofrar estos elementos correspondió al sistema Topflex del proveedor Aluma System. Este sistema consiste en mesas voladoras compuestas por láminas de Plywood colocadas sobre vigas de madera secundarias, las cuales a su vez están sobre vigas de madera principales y todos estos elementos soportados por puntales de acero. Como en Revit no se disponen de familias específicas que contengan un sistema de mesas que permitan representar el sistema Topflex, se procedió a crear familias para las vigas y las láminas de Plywood. Para los puntales se hizo uso de familias contenidas en un complemento creado por la empresa Peri, el cual fue descargado y añadido a Revit.

Las familias de láminas de Plywood se crearon con un grosor de 18mm y con las medidas mostradas en el cuadro 11. Estas láminas se venden con medidas de 2.44x1.22m, por lo tanto, las láminas con medidas distintas deberán ser cortadas. La lamina se pintó de color gris en su cara superior para que asemejara al material fenólico, el cual es un material que aísla la madera de la humedad (FENOLTEC, 2020).

Las vigas principales y secundarias denominadas por el proveedor como vigas H20, corresponde a vigas de madera con dimensiones de 20cm de alto, 8cm de ancho, 2.7cm de grosor en el alma y 4cm de grosor en las alas. Para el armado de mesas se utilizaron vigas principales con una longitud máxima de 5.50m y una mínima de 1.22, mientras en las vigas secundarias la longitud máxima fue de 3.65m y la mínima de 0.61m. Estas vigas fueron modeladas con las medidas mencionadas y además se pintaron de color amarillo para que asemeje a las utilizadas en este tipo de obras.

En el caso de los puntales se utilizaron los incluidos dentro del complemento proporcionado por la empresa Peri, los cuales tienen una altura máxima de 3.5m pero que se ajustaron a una altura de 3.122m para ser utilizados en los niveles del 1 al 8, los cuales tiene una altura de 3.75m. Para el nivel P3 que tiene una altura de 4.7m, se utilizaron andamios de carga con puntales con una altura máxima de 5m, pero ajustados a una altura de 4.322m. Las alturas de estos puntales junto con la altura de las vigas principales, las vigas secundarias y las

láminas de Plywood, sumaban la altura requerida de las mesas para la construcción de los entresijos.

Ya teniendo todos los elementos modelados, se procedió a crear una familia en la cual se juntarán todos estos elementos y se crearán las mesas voladoras. Se crearon mesas con diferentes configuraciones según eran requeridas, el cuadro 12 muestra las dimensiones y una identificación para cada mesa creada.

A partir de las mesas con las que se contaba, se fueron colocando en los niveles de tal forma que se pudiera aprovechar la mayor área posible cubierta por las mesas, sin embargo, en muchos casos esto no fue posible, como por ejemplo en las zonas donde había columnas. Para estos casos se utilizaron completamientos de madera que fueron creados directamente en el modelo y se fueron ajustando a los espacios donde se requería. Estos completamientos son soportados por puntales creados igualmente con el complemento de Peri en Revit y ajustados a la altura requerida. Ya teniendo todo el espacio cubierto en donde se iban a construir los entresijos, se procedió a generar planos de modulaciones de encofrados como los que vemos en el apéndice 5 y que incluyen la identificación creada para cada mesa.

En cuanto a la creación de familias es importante destacar que Revit posee una gran cantidad de plantillas que según sea lo que se quiera crear, estas poseen características o propiedades que ayudan a que los elementos sean creados con mayor facilidad. Para el caso de las vigas se utilizó la familia de armazones estructurales para vigas y tornapuntas, en la cual solo se ajustaron las medidas y se eligieron los materiales requeridos. Para el caso de los paneles para encofrados de muros y columnas, las láminas de Plywood y las mesas, se utilizó la familia de modelos genéricos, la cuál es una familia que no posee propiedades características de algún elemento, si no que más bien es el usuario quien las define. Estos modelos genéricos se utilizaron debido a que como estos elementos son tan particulares, Revit no posee dentro de sus librerías alguna plantilla que pudiera aprovecharse.

Al completar el modelado de todos los elementos mencionados, se crearon parámetros que pudieran describir a cada uno de los elementos y que se ajustaran a las actividades perteneciente al ciclo de postensado de

entresijos y el ciclo de construcción de columnas y muros. Estos parámetros fueron creados a partir de una herramienta de Revit llamada parámetros compartidos, que como se mencionó en la metodología, permite crear y modificar parámetros que sean compartidos entre elementos especificados y que el usuario en las propiedades de estos elementos pueda ingresar los valores que considere adecuados. En el caso de este proyecto, se crearon 3 parámetros compartidos, los cuales fueron la asignación del nivel en el cual se encontraban los elementos, el código de la EDT incluido en el cronograma y la sección del entresijo en la cual se ubicaban. La creación de los parámetros de nivel y de sección, se realizó por razones meramente descriptivas, pero el caso de la EDT presentaba un valor agregado, ya que como se ve en la siguiente sección de modelos 4D y 5D, este parámetro fue fundamental para crear la coordinación entre el modelo 3D y el cronograma del proyecto.

Modelos 4D y 5D

Al tener listos tanto el cronograma del proyecto y el modelo 3D, se procedió a realizar la coordinación de estos elementos en el programa Navisworks. La exportación del modelo 3D se realizó desde el complemento instalado en Revit, mientras que el cronograma creado en MS Project se importó directamente desde Navisworks en la herramienta timeliner.

Con respecto al cronograma importado desde MS Project, es de suma importancia recalcar que la duración de las actividades de armado de mesas y de formateo de columnas y muros, fue modificada con respecto al cronograma original. La razón de esta modificación, obedece a que Navisworks mediante la herramienta de timeliner, asume las tareas como recursos, es decir, solo reconoce la duración de las actividades tal y como se definieron en el cronograma original y esto genera un problema con las tareas mencionadas, ya que al contener elementos que se utilizan solamente por un tiempo definido y una vez cumplido este tiempo se transportan a otros niveles, si estas se dejan con la duración del cronograma original, a la hora de realizar la simulación solo van a aparecer dentro de ese rango de días definido y no como verdaderamente son utilizadas dentro de la construcción. Es por esta razón que la duración

de estas tareas en el cronograma de Navisworks, aparecen con la cantidad de días necesarios que ocupan tanto las mesas de encofrado de entrepiso como los paneles de encofrado de columnas y muros. Esta duración va en función de la capacidad que tenga el entrepiso, las columnas y los muros que fueron encofrados, así como la capacidad que tenga el entrepiso, las columnas y muros a los cuales se van a transportar los sistemas de encofrado, de poder soportar cargas que le serán impuestas. La figura 60 muestra como se ve el modelo 3D y una parte del cronograma del proyecto en Navisworks.

Para seguir con la coordinación de estos archivos, se generaron conjuntos de selección con la ayuda de la herramienta de búsqueda de elementos de Navisworks. La búsqueda se personalizó al seleccionar "componente" en la columna de categoría, "WBS" en la columna de propiedad, "igual a" en la columna de condición y en la columna de valor se fue colocando el código de la WBS asignado para los elementos. El programa busca todos los elementos asociados a ese código y los señala dentro del modelo 3D, lo que permite utilizar la herramienta de conjuntos de selección para guardar esos elementos seleccionados. Estos conjuntos de selección fueron guardados con el mismo nombre del código de la WBS, esto con la finalidad de poder enlazarlos a las tareas de los cronogramas, como veremos en los siguientes párrafos. La figura 61 muestra la creación de un conjunto de selección a partir de la herramienta de búsqueda de elementos, donde además se puede ver como los elementos del modelo 3D son señalados.

El haber asignado un código de la WBS o EDT a cada elemento, género que la búsqueda fuera sumamente sencilla y de gran utilidad, porque como vimos anteriormente, los ciclos poseen tareas que involucran un conjunto de elementos del modelo 3D y de no ser por haber asignado estos códigos, la búsqueda hubiera tenido que hacerse elemento por elemento, lo cual generaría una pérdida de tiempo innecesaria.

Ya teniendo todos los elementos asignados con un conjunto de selección, se procedió a realizar el enlazado de estos a las tareas del cronograma. Esto se realizó utilizando el enlazado automático presente en la herramienta de timeliner. Para realizar este enlazado automático fue necesario definir reglas, las cuales se basaron en definir la columna de la

WBS o EDT como referencia y también seleccionar que los elementos contenidos en esta columna se enlacen automáticamente con los conjuntos de selección que llevan el mismo nombre. En este punto se vuelve nuevamente importante, el haber asignado el mismo código de la EDT de las tareas a los conjuntos de selección, ya que el enlazado automático se realiza en cuestión de momentos, contrario a si la asignación se hiciera tarea por tarea, ya que se demoraría muchísimo más tiempo y la posibilidad de equivocarse es muy alta.

Además, es importante mencionar que los elementos del piso P1 al P3 que ya están construidos, se les asignó el primer código de la WBS y por lo tanto un conjunto de selección en el cual están asignados todos estos elementos. Este conjunto de selección se enlazó con la tarea inicio, la cual no tiene ninguna duración dentro del cronograma y, por lo tanto, a la hora de realizar la simulación, estos elementos van a aparecer construidos desde un inicio.

También otro importante a destacar, fue que los conjuntos de selección correspondientes a los elementos del sistema de mesas de encofrado de entresijos y del sistema de encofrados de columnas y muros, fueron enlazados a varias tareas dentro del cronograma, debido a que estos elementos corresponden a recursos que tienen un tiempo definido y que cuando cumplan su función de encofrar los elementos en un nivel, estos son trasladados a otro nivel para ser reutilizados.

Todos los conjuntos de selección fueron ordenados según el nivel y la sección en la cual los elementos se encontraban ubicados. La figura 62 muestra una parte de estos conjuntos de selección, así como del modelo y del timeliner, al haber asignado la sección A del entresijo del nivel 2 resaltado en color azul.

El siguiente paso fue el asignar el tipo de tareas en el cronograma, que como se mencionó en la metodología, se pueden elegir elementos para construcción, elementos temporales y elementos que se vayan a demoler. Para el caso del ciclo de postensado de entresijos las tareas que se les asignó el estatus de construcción fueron las tareas de colocación del acero superior, colocación de cables de postensado, colocación del acero inferior y chorrea, mientras que el estatus de elementos temporales fue asignado únicamente al armado de mesas. Para el ciclo de construcción de columnas y muros, se

les asignó el estatus de construcción a las tareas de revestido y chorrea, mientras que el estatus de elementos temporales fue asignado únicamente al formateo. A las demás actividades no se les asignó un tipo de tarea, porque estas no tienen un conjunto de selección asociado, o sea, son tareas que no dependen de elementos físicos y que en la simulación solo van a estar representadas con la cantidad de días asignados en el cronograma.

Para poder realizar la simulación, a parte del desarrollo de todas las actividades anteriormente mencionadas, se necesita definir el aspecto que tendrán los elementos al inicio, durante y después del tiempo de simulación asignado, según sea el tipo de tarea seleccionado. En el caso de las tareas con estatus de elementos en construcción, se les asignó un aspecto de inicio de color verde transparente y durante la simulación y al final el aspecto con el cual fueron modelados, como se puede observar en la figura 63. Para el caso del estatus de elementos temporales, se les asignó un aspecto de inicio de color rojo al 90% transparente y durante y al final de la simulación el aspecto con el cual fueron modelados, como se puede observar en la figura 64.

Ya dentro de la ventana de simular en la herramienta timeliner, se procedió a ingresar en las configuraciones, donde se definió en un día el tamaño del intervalo y la duración de la reproducción en 150 segundos. Ya teniendo todo listo se procede a correr el programa, en el cual se puede observar cómo va avanzando la construcción del edificio y en la esquina superior izquierda aparece el tiempo y la cantidad de dinero que se va gastando. Al final de la simulación se obtuvo un tiempo total de 4.8 meses, y un total de \$721 823.41. El video correspondiente a esa simulación, se adjunta a este trabajo en formato de video AVI.

Gestión de la calidad

Como último objetivo, se crearon hojas de gestión de la calidad para la mayoría de las actividades incluidas en los ciclos de postensado de entresijos y en el ciclo de construcción de columnas y muros. Se dice que se abarcaron la

gran mayoría de actividades, debido a que la actividad de inspección estructural fue la única que no se tomó en cuenta para el desarrollo de este objetivo, debido a que es una actividad que si bien es cierto su duración se debe de incluir en el cronograma, es realizada por un ingeniero estructural que llega un día en específico a revisar cómo va la obra, pero que no está del todo involucrado en la construcción del edificio, por lo tanto, se consideró que no era necesario incluirla.

Antes de crear las hojas o plantillas, fue necesario establecer la información sobre gestión de calidad a incluir en cada una ellas. Primeramente, se crearon una serie de actividades para cada una de las tareas de los ciclos, en las cuales se abarcó de una forma secuencial la manera en cómo se deben de ir construyendo cada uno de los elementos mencionados, teniendo como principal objetivo la búsqueda de la calidad. En estas actividades se buscó principalmente determinar mediante verificaciones, si el estado de los materiales para construir los diferentes elementos es el idóneo, si estos materiales son colocados en la posición correcta siguiendo las especificaciones dadas en planos, si los métodos de unión entre elementos son realizados correctamente, si el cortado de los elementos es el correcto, entre otros. Toda esta información fue representada mediante la utilización de diagramas de Ishikawa como se pueden ver en las figuras 65 y 66, y también los diagramas de flujo presentados como ejemplo en las figuras 67 y 68. El diagrama de Ishikawa permitió identificar las diferentes tareas que son necesarias para que se diera un correcto control de calidad, y los diagramas de flujo permitieron ver de una forma más ordenada y con un sentido lógico, como es que se aplica el control de la calidad en la construcción de los entresijos, columnas y muros.

Al tener toda la información necesaria, se procedió a crear las hojas de control de calidad, las cuales fueron desarrolladas a partir de macros en Excel. En la primera hoja de este archivo, se muestra una página de inicio con una interfaz sencilla, en la cual el usuario elige a partir de la elección de un elemento y de una tarea asociada, si quiere ingresar a ver los diagramas de causa-efecto o de Ishikawa correspondientes al elemento seleccionado, si quiere ingresar a la hoja de control de calidad de la tarea seleccionada, si quiere ingresar al diagrama de

flujo de la tarea seleccionada o si quiere ingresar a una base de datos. La figura 69 muestra la página de inicio mencionada.

La primera opción corresponde a una hoja de Excel creada exclusivamente para poder visualizar alguno de los diagramas de Ishikawa mostrados anteriormente, a partir del elemento elegido en la hoja de inicio. Esta hoja incluye solamente el diagrama de Ishikawa y un botón de salir que permite volver a la hoja de inicio.

La segunda opción nos envía a una hoja de Excel donde se crearon las hojas de control de calidad. Estas hojas fueron creadas para todas las actividades pertenecientes al ciclo de postensado de entrepisos y para el ciclo de construcción de columnas y muros. En esta hoja como se puede ver en la figura 70, se deben de ingresar aspectos generales como lo son el nombre del profesional a cargo, la fecha y el nivel y sección en la cual se encuentra ubicado el elemento. Luego aparecen una serie de preguntas basadas en las verificaciones de control de calidad para cada tarea específica. Estas preguntas se deben de responder con un **Sí** o un **No** y también se debe de brindar una calificación del 1 al 5 de cómo evalúa el desarrollo de lo que se le está preguntando, siendo un 1 muy malo, 2 malo, 3 regular, 4 bueno y 5 muy bueno. Al responder todas las preguntas y al haber asignado una calificación a cada una de ellas, la hoja mediante un sistema de calificación automático promedia todas las calificaciones brindadas y las divide entre la cantidad de preguntas, con lo que se obtiene una calificación promedio de toda la actividad en general. A partir de esta calificación promedio, el sistema determina cómo fue la ejecución de la tarea, siendo una ejecución muy mala las calificaciones promediadas menores o iguales a 20, una ejecución mala para las calificaciones mayores a 20 pero menores o iguales a 40, una ejecución regular para las calificaciones mayores a 40 pero menores o iguales a 60, una ejecución buena para las calificaciones mayores a 60 pero menores o iguales a 80 y una ejecución muy buena para las calificaciones mayores a 80 pero menores o iguales a 100. Además, en la parte final de la hoja se dispone de un espacio para realizar las observaciones que considere necesarias. La calificación obtenida determinará si se deben de aplicar sanciones a subcontratistas, necesidad de retrabajos, aplicar ingeniería de valor o simplemente determinar que

la actividad se realizó de una forma adecuada y no requiere ningún cambio. La hoja cuenta con 4 botones colocados abajo del espacio destinado para observaciones, con los cuales se puede exportar la hoja de control de calidad con un formato PDF, guardar la hoja en la base de datos, limpiar todos los espacios de relleno de la hoja y por último un botón que nos permite volver al menú de inicio.

La tercera opción corresponde a la hoja donde se incluyen los diagramas de flujo mostrados anteriormente para cada actividad. En esta hoja solo se incluyen los diagramas de flujo y un botón para devolverse al menú de inicio.

Y por lo último, se puede elegir el ingresar a la base de datos de cada actividad, en la cual se guardan las hojas de control de calidad. La hoja solo incluye las hojas guardadas y un botón para volver al menú de inicio.

Todo este sistema fue creado con la finalidad de tener una opción o propuesta de control de calidad, para que cuando se construya el edificio D, este pueda servir como seguimiento y control de cada una de las actividades necesarias para la construcción de entrepisos, muros y columnas.

Conclusiones

- Por medio de los cronogramas y del escenario de 3 cuadrillas de encofrados, se concluyó que el sistema de encofrado a utilizar es el sistema RASTO-TAKKO de Aluma System para las columnas y muros, y el sistema Topflex de Aluma System para los entresijos. La decisión de estos sistemas pasó por 4 factores:
 - Experiencia comprobada en la construcción del edificio C.
 - Menor precio de alquiler.
 - Disponibilidad y facilidad de colocación.
 - Facilidad de transporte de los elementos encofrantes

La duración fue de 4.8 meses y un costo de \$721,823.41.

- Se modelaron todas las columnas, muros y entresijos del proyecto, junto con sus componentes. El alcance que puede tener un modelado 3D dependerá del cuidado que se tenga con el manejo e inclusión de la información en los programas, ya que el proceso puede volverse muy complejo. Además, a la hora de modelar se debe de seguir un orden lógico de construcción, o sea, se debe de modelar como se va a construir.
- Se creó una interoperabilidad entre los programas Revit, MS Project y Navisworks, que permitió generar modelos 4D y 5D donde se puede ver cómo va a avanzar la construcción del edificio D en relación con el tiempo y el costo. En este punto es importante

destacar que si bien es cierto se logró crear un flujo de trabajo, se presentaron problemas entre los programas que dificultaron la interoperabilidad.

- Se destaca la importancia del BIM dentro de un proyecto constructivo, ya que permite tener una mayor capacidad para realizar revisiones y detectar errores, una mejora sustancial en la planificación de las diferentes actividades lo que conlleva a un mejor manejo del tiempo y del costo.
- Se realizaron plantillas para el control de calidad las cuales incluyen diagramas de flujo que ayudan al usuario a tener un mejor entendimiento de los procesos que se deben de llevar a cabo para desarrollar cierta actividad, así como diagramas de Ishikawa que tienen una serie de tareas que garantizan la calidad en esos procesos. Además, las listas de verificación permiten de una forma sencilla el llevar un control de lo que se hace o se deja de hacer en un proyecto y le permiten al usuario calificar cada una de las tareas y al finalizar tener una calificación global del proceso. Estas plantillas también permitirán tener un respaldo de las hojas de control de calidad elaboradas, para que en cualquier momento puedan ser consultadas, a partir de una base de datos exclusiva para cada proceso constructivo.

Recomendaciones

- Se recomienda implementar la filosofía BIM en los procesos constructivos de la empresa, ya que, los beneficios que puede generar serian muchos, tal como una mejor coordinación de las diferentes disciplinas involucradas en un proyecto constructivo.
- Además, se recomienda crear un modelo 3D a partir de un ambiente colaborativo, ya que para este proyecto se realizó a partir de los planos 2D lo que complico mucho el modelado en cuanto al tiempo y la precisión en la ubicación de los elementos estructurales. Por lo tanto, es importante definir en el contrato del proyecto que los colaboradores y subcontratistas trabajen bajo un modelo colaborativo.
- Se sugiere llevar un control de calidad de los procesos constructivos mediante la utilización de listas de verificación para que los usuarios puedan constatar que las tareas sean desarrolladas bajo estándares de calidad.

Apéndices

Apéndice 1. Entrevista sobre los procesos constructivos de entresijos y columnas del Edificio C desarrollado por la empresa ROCCA Development Group.

Apéndice 2. Entrevista sobre los procesos constructivos de entresijos y columnas del Edificio D desarrollado por la empresa ROCCA Development Group.

Apéndice 3. Entrevista sobre los sistemas de encofrado de entresijos, columnas y muros propuestos para la construcción del Edificio D por parte de la empresa ROCCA Development Group.

Apéndice 4. Imágenes del modelado 3D y vistas de las diferentes columnas y muros del Edificio D.

Apéndice 5. Planos de modulación de encofrados de los entresijos del Edificio D.

Apéndice 1. Entrevista sobre los procesos constructivos de entrepisos, columnas y muros del edificio C desarrollado por la empresa ROCCA Development Group

Datos del encuestado

Nombre: Marlon Navarro

Puesto en la empresa: Ingeniero de Proyectos

Preguntas:

Sistema de encofrado

1. ¿Cuál fue la empresa de sistemas de encofrado contratada para el proyecto?

Fue la empresa Aluma Systems

2. ¿Cuál fue el tipo de sistema de encofrado utilizado?

Para los entrepisos se utilizó el sistema Aluma Frame y para columnas y muros el Sistema RASTO-TAKKO.

3. ¿Por qué se eligió este sistema sobre otros?

Por precio, facilidad de colocación y Transporte, experiencia comprobada del Proveedor.

4. ¿Se tuvieron problemas o imprevistos con el sistema de encofrado?

Se generó una sobreasignación de la grúa lo que generó tiempos de espera entre Actividades.

5. ¿Cómo se realizó la modulación del sistema de encofrado elegido?

La modulación fue proporcionada por el proveedor y revisada por nuestra empresa.

6. ¿Cuáles fueron las dimensiones del sistema de encofrado elegido?

Se utilizaron 3 tamaños de mesas, las cuales

rondaban los 20m² a 24m²

7. ¿Cuál fue el tiempo necesario para la colocación y el desencofrado del sistema de encofrado?

Se colocaban de 800m² a 1200m² en un periodo de 2 a 3 días.

8. ¿Cuál maquinaria se utilizaba para la movilización del material del encofrado?

Se utilizó una grúa torre para la movilización.

Sistema de entrepiso

1. ¿Cuál fue el sistema de entrepiso utilizado?

Sistema postensado con tendones adheridos y desadheridos.

2. ¿Cuál fue el espesor de las losas de entrepiso?

De 25 cm a 28 cm

3. ¿Cuánto tiempo fue necesario para la colocación de los elementos que componían el sistema de entrepiso previo al colado?

Cada nivel se coló en 2 sectores, entre cada sector se duró alrededor de 3 días. Entre cada nivel se duró alrededor de 12 días.

Mezclas de concreto

1. ¿Cuáles fueron las resistencias y tiempo de fraguado de las mezclas de concreto utilizadas?

f'c 210 kg/cm² a 3 días

2. ¿Cuál equipo se utilizó para la colocación de las mezclas de concreto?
Bomba telescópica doble

Características del proyecto

1. Ubicación del edificio
Santa Ana San José

2. ¿Cuál fue el uso que se le dio al edificio?
Destinado para el comercio y la hotelería

3. ¿Cuál fue la cantidad de pisos del edificio?
10 niveles: 3 de parqueo, 1 comercial y 6 para el hotel

4. ¿Cuánto tiempo fue el incurrido en la construcción de este edificio?
9 meses

5. ¿Cuál fue el costo total del edificio?
7 millones de dólares

Apéndice 2. Entrevista sobre los procesos constructivos de entrepisos, columnas y muros del edificio D desarrollado por la empresa ROCCA Development Group

Datos del encuestado

Nombre: Marlon Navarro

Puesto en la empresa: Ingeniero de Proyectos

Preguntas:

Características del proyecto

1. Ubicación del edificio
Santa Ana San José

2. ¿Cuál es el uso que se le dará al edificio?
Comercial y oficinas

3. ¿Cuál será la cantidad de pisos del edificio?
11 niveles: 3 de parqueo, 1 comercial y 7 de oficinas

Apéndice 3. Entrevistas sobre los sistemas de encofrado de entrepisos, columnas y muros propuestos para la construcción del edificio D por parte de la empresa ROCCA Development Group

Datos del encuestado

Empresa: Terra Equipos

Preguntas:

1. ¿Cuál es el nombre del sistema de encofrado propuesto?

HD 150

2. ¿Cuál es el material de fabricación del sistema de encofrado?

Vigas de madera soportadas por andamios de carga de acero.

3. ¿Cuál es el rendimiento por día del sistema?

600 m²/día

4. ¿Qué equipo o maquinaria es necesaria para la movilización de los elementos del sistema de encofrado?

Se utiliza una grúa torre izando la mesa.

5. ¿Cuál es el precio de alquiler de este sistema de encofrado?

\$7.25/m²

6. ¿Cuál es la disponibilidad de entrega de este sistema de encofrado?

Inmediata

7. ¿La empresa brinda asesoría para la utilización de este sistema de encofrado?

Se le da una asesoría completa al cliente.

8. ¿Cuál característica hace diferente este tipo de sistema comparado con el de la competencia?

Mayor estabilidad lateral por las abrazaderas diagonales que posee. Desarmado sencillo y no se deben de desarmar todas las piezas, ya que se utilizan carros con rodines

Datos del encuestado

Empresa: RENTECO

Preguntas:

1. ¿Cuál es el nombre del sistema de encofrado propuesto?

DOKA Table

2. ¿Cuál es el material de fabricación del sistema de encofrado?

Vigas de madera soportadas por puntales de acero.

3. ¿Cuál es el rendimiento por día del sistema?

600 m²/día

4. ¿Qué equipo o maquinaria es necesaria para la movilización de los elementos del sistema de encofrado?

Se utiliza una grúa torre izando la mesa.

5. ¿Cuál es el precio de alquiler de este sistema de encofrado?

\$7.50/m²

6. ¿Cuál es la disponibilidad de entrega de este sistema de encofrado?

Inmediata

7. ¿La empresa brinda asesoría para la utilización de este sistema de encofrado?

Asesoría completa al cliente. También se brindan planos de modulación.

8. ¿Cuál característica hace diferente este tipo de sistema comparado con el de la competencia?

Fácil armado y desarmado debido a su poca cantidad de piezas.

Facilidad para ajustar la altura requerida, ya que los puntales poseen el ajuste en la parte inferior.

Datos del encuestado

Empresa: FYPSA

Preguntas:

1. ¿Cuál es el nombre del sistema de encofrado propuesto?

Mesas volantes y sistema rapideck

2. ¿Cuál es el material de fabricación del sistema de encofrado?

Mesas volantes: Vigas de madera soportadas por puntales de acero.

Rapideck: Sistema de paneles de aluminio soportados por puntales y cerchas de acero.

3. ¿Cuál es el rendimiento por día del sistema?

Mesas volantes: 600 m²/día

Rapideck: 500 m²/día

4. ¿Qué equipo o maquinaria es necesaria para la movilización de los elementos del sistema de encofrado?

Mesas volantes: Se utiliza una grúa torre izando la mesa.

Rapideck: Su armado y desarmado se realiza sin la ayuda de una grúa, lo cual permite un ahorro considerable de dinero.

5. ¿Cuál es el precio de alquiler de este sistema de encofrado?

Mesas volantes: \$6.55/m²

Rapideck: \$9.00/m²

6. ¿Cuál es la disponibilidad de entrega de este sistema de encofrado?

Mesas volantes: No inmediata (de 8 a 10 semanas)

Rapideck: No inmediata (aproximadamente 1 mes de importación)

7. ¿La empresa brinda asesoría para la utilización de este sistema de encofrado?

Asesoría completa al cliente. También se brindan planos de modulación.

8. ¿Cuál característica hace diferente este tipo de sistema comparado con el de la competencia?

Mesas volantes: Fácil armado y desarmado debido a su poca cantidad de piezas.

Rapideck: Sistema muy liviano, lo que permite una fácil movilización.

Datos del encuestado

Empresa: ALUMA SYSTEM

Preguntas:

1. ¿Cuál es el nombre del sistema de encofrado propuesto?

Aluma Frame y TOPFLEX

2. ¿Cuál es el material de fabricación del sistema de encofrado?

Aluma Frame: Vigas de aluminio soportadas por marcos de aluminio.

Topflex: Vigas de madera soportadas por puntales de acero.

3. ¿Cuál es el rendimiento por día del sistema?

Aluma Frame: 600 m²/día

Topflex: 600 m²/día

4. ¿Qué equipo o maquinaria es necesaria para la movilización de los elementos del sistema de encofrado?

Aluma Frame: Se utiliza una grúa torre izando la mesa.

Topflex: Se utiliza una grúa torre izando la mesa.

5. ¿Cuál es el precio de alquiler de este sistema de encofrado?

Aluma Frame volantes: \$6.50/m²

Topflex: \$6.00/m²

6. ¿Cuál es la disponibilidad de entrega de este sistema de encofrado?

Aluma Frame: Inmediata

Topflex: Inmediata

7. ¿La empresa brinda asesoría para la utilización de este sistema de encofrado?

Asesoría completa al cliente. También se brindan planos de modulación.

8. ¿Cuál característica hace diferente este tipo de sistema comparado con el de la competencia?

Aluma Frame: Sistema muy liviano, lo que permite una fácil movilización. Gran capacidad estructural.

Topflex: Sistema con una alta versatilidad. Alta capacidad estructural, lo que permite su utilización en losas con espesores mayores a los 30 cm.

Referencias

- [1] Cuevas, O. (2005). *Aspectos fundamentales del concreto reforzado*. México D.F, México: Editorial Limusa.
- [2] Hymans, M. (2013). *Optimization of post-tensioned concrete floor slabs*. Milan, Italia: Politécnico de Milan
- [3] Hurd, M. (2005). *Formwork for concrete*. Michigan, Estados Unidos: American Concrete Institute.
- [4] McCormac, J., & Brown, R. (2011). *Diseño de concreto reforzado*. México D.F, México: Alfaomega.
- [5] Navarro, M. (2019). Comunicación personal.
- [6] Nilson, A. (1999). *Diseño de estructuras de concreto*. Bogotá, Colombia: McGRAW-HILL.
- [7] Project Management Institute. (2013). *Guía de los fundamentos para la dirección de proyectos (Guía del PMBOK)*. Pensilvania, Estados Unidos: PMI Publications.