

Simulación Digital como Herramienta para la Gestión del Conocimiento en la Construcción de Edificaciones en Concreto*

Digital Simulation: A Tool for Knowledge Management in Concrete Buildings Construction

Artículo de Investigación Científica - Fecha de Recepción: 27 de marzo de 2014 - Fecha de Aceptación: 13 de mayo de 2014

Adriana Gómez Cabrera

Magister en Ingeniería Civil. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá (Colombia). adrianagomez@javeriana.edu.co

Alfonso Rafael Orozco Ovalle

Ingeniero Civil. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá (Colombia). alfonso.orozco@javeriana.edu.co

Para citar este artículo / To reference this article:

A. Gómez Cabrera and A. R. Orozco Ovalle, "Simulación Digital como Herramienta para la Gestión del Conocimiento en la Construcción de Edificaciones en Concreto," *INGE CUC*, vol. 10, no. 1, pp. 75–82, 2014.

Resumen: Quienes ejecutan construcciones enfrentan situaciones que generan pérdidas y atrasos. Por esto, es un reto permanente aumentar la productividad y la optimización de recursos; situación que ha sido confrontado de muchas maneras, entre otras, con la utilización de herramientas computacionales. En este trabajo se presenta la elaboración de modelos de simulación digital a partir de información real proveniente de un módulo programable y autónomo para captura de fotografías digitales de los procesos involucrados en la construcción de losas en concreto postensado. Se caracterizaron los procesos constructivos, teniendo en cuenta el flujo de actividades, la disposición de los recursos y duraciones. Con la información recolectada se elaboró un modelo de simulación digital, que permitió analizar la productividad de la mano de obra y factores generadores de pérdidas en el proceso constructivo. Se elaboraron otros modelos de simulación digital evaluando alternativas teóricas y cambios en el método real de construcción; comparando los resultados obtenidos entre alternativas y el modelo original.

Palabras clave: Simulación Digital, Mejoramiento de Procesos Constructivos, Construcción sin Pérdidas.

Abstract: People who execute construction projects have to face situations which generate waste and delays. Because of this, it is a permanent challenge to increase construction productivity and resource optimization; this has been tackled in several ways, including the use of computational tools. In this paper, digital simulation models were elaborated based on real information coming from a programmable and autonomous module for digital photography shooting of the processes involved in post tensioned concrete slabs construction. These processes were characterized taking into account activity flow, human resource availability, and times involved in the activities. This information was the starting point for the creation of a digital simulation model that makes possible to analyze manpower disposition and productivity during the whole process and factors generating delays and loss. Furthermore, other digital simulation models were created in order to evaluate theoretical alternatives and real-life construction method changes.

Keywords: Digital Simulation, Construction Processes Improvement, Lean Construction.

* Artículo de investigación científica, derivado del proyecto de investigación titulado: "Integración de herramientas digitales para planeación y control de proyectos civiles" de la Pontificia Universidad Javeriana. Fecha de Inicio: enero de 2013. Fecha de Finalización: junio de 2014.

I. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, la construcción es fuente de equivocaciones durante los procesos de planeación y ejecución de obras, producto de la programación desafortunada y la asignación inadecuada de funciones y recursos. A raíz de esto, los desarrolladores de proyectos han implementado nuevas herramientas en sus procesos de gestión, con el fin de minimizar incumplimientos de plazos establecidos [1].

Una de las herramientas implementadas en el gremio ha sido la filosofía *Lean Construction*, con el fin de mejorar la productividad en los proyectos de construcción, priorizando las actividades que agregan valor sobre aquellas que no agregan valor, tratando de reducir estas últimas a la menor cantidad o, si es posible, eliminarlas por completo [2].

En el marco de la filosofía *Lean Construction*, la simulación de procesos constructivos es una estrategia que permite aplicar sus planteamientos. Esta investigación permitió elaborar modelos de simulación, partiendo de registros de imágenes provenientes de cámaras fotográficas instaladas en campo, que permitieron identificar elementos como materiales utilizados, tiempos empleados, cuadrillas y la disposición de estas en la construcción de una losa en concreto postensado, perteneciente a la estructura del edificio correspondiente a la nueva Facultad de Artes de la Pontificia Universidad Javeriana. Una vez sistematizada esa información, se elaboraron los modelos de simulación en el software Arena 14[®] de Rockwell Automation [1], que facilitó la determinación de los factores más influyentes en el desarrollo del proceso constructivo. Posteriormente se elaboraron otros modelos de simulación para distintos escenarios teóricos, y se obtuvieron resultados favorables en cuanto a tiempo de duración del proceso constructivo. Estos nuevos escenarios teóricos se plantearon variando la cantidad y tipos de recursos.

En cuanto a los antecedentes, desde la década de los 70 se han venido realizando investigaciones sobre la simulación de distintos procesos constructivos en aras de mejorar la productividad en construcción. Unas de las herramientas utilizadas inicialmente fueron CYCLONE y MICROCYCLONE, mediante las cuales se realizaron técnicas de simulación para modelar y evaluar procesos constructivos [3].

Algunos ejemplos de investigaciones relacionadas son:

- Utilización de la simulación digital para predecir rendimientos en obra, por medio de la herramienta SDESA (*Simplified discrete-event simulation approach for construction simulation*), aplicada a la construcción de pavimentos [4].
- Otros autores desarrollan un juego llamado LEAPCON[™], el cual simula el proceso constructivo de un edificio de 8 pisos con 32 apartamentos utilizando piezas LEGO[®]. Este juego se desarrolla en dos rondas: la primera simula el sistema

constructivo tradicional; y la segunda aplica la filosofía *Lean Construction*. Las múltiples ejecuciones del juego permiten identificar tiempos de ciclo, flujo de caja y los niveles de trabajo en progreso [5].

- En el trabajo correspondiente a la referencia [6] utilizan un algoritmo para analizar el manejo de materiales en la construcción de un viaducto; mientras que la referencia [7] utiliza la herramienta STROBOSCOPE[®] para simular el proceso constructivo de losas prefabricadas, comparando distintos métodos constructivos de las losas para lograr optimizar tiempos y costos.
- A nivel nacional se han llevado a cabo investigaciones con distintos softwares, como la referencia [8], que utilizó *Myero Cyclone*; STROBOSCOPE[®] fue utilizada por los autores citados en la referencia [9]; y la referencia [10] menciona que se basaron en la herramienta SISPLAN[®]. Ya en tiempos más recientes se ha utilizado con frecuencia el software Arena para la simulación digital. En la referencia [11] se simuló a través de Arena el proceso constructivo de una edificación de 600 m² partiendo de información real; al igual que en la referencia [12], quienes obtenían información real a partir de videos *Time Lapse*.
- Otro estudio propone la implementación conjunta de la simulación de operaciones y de la técnica de líneas de balance en la etapa de estructura; específicamente en el armado y fundición de muros y losa de una construcción de dos torres de 17 pisos de apartamentos; específicamente, modelaron en el software Arena[®] el proyecto como se ejecuta por parte de los constructores, y con la técnica de líneas de balance generaron dos escenarios alternativos para comparar los tiempos y costos de terminación del proyecto. Se encontró que “la simulación de escenarios alimentada a partir del análisis de las líneas de balance permite la comparación y la toma de decisiones con menor incertidumbre que la proporcionada a través del conocimiento empírico”; adicionalmente, la metodología que se implementó puede emplearse en otras actividades de la construcción [13].
- Un estudio adicional plantea la necesidad de estudiar nuevos escenarios y herramientas a través de la simulación de eventos discretos en un proyecto de construcción en Colombia, aplicado a la preparación de mezclas, transporte y disposición de concreto en una torre de apartamentos de 24 pisos. Utilizando el software Arena[®] se creó el modelo de simulación y se analizaron las variables de tiempo y costo, lo cual permite un desempeño superior al del sistema manejado inicialmente y redujo costos en tiempo del proceso. Los beneficios en la aplicación de la simulación redundaron en la generación de importante información para facilitar y hacer más efectivo y eficiente el proceso de planificación y control de los proyectos de construcción [14].

II. METODOLOGÍA

Esta investigación tuvo tres etapas principales: registro de información, caracterización de procesos constructivos y elaboración del modelo digital.

A. Registro de Información

El proyecto de construcción utilizado como base de esta investigación es el edificio correspondiente a la nueva Facultad de Artes de la Universidad Javeriana, que se encuentra en ejecución.

El edificio de la nueva Facultad de Artes de la Universidad Javeriana consiste en una torre compuesta de seis niveles y tres sótanos, con área de plataforma de cuatro niveles sobre el último sótano que conforma las plazas de acceso y circulación contra la torre. La tipología arquitectónica es de planta libre y la modulación de la estructura está organizada alrededor del punto fijo central, con ejes cada 8.00 metros en una dirección y cada 9.65 m en la otra. En los costados norte y sur del edificio, la arquitectura dispone volúmenes en voladizo que se alternan cada dos pisos.

En la primera etapa del proyecto se obtuvo la información necesaria para elaborar el modelo de simulación. Los mecanismos de captura de información fueron los siguientes:

- **Sistema automático de captura de imágenes:** Este sistema permite un monitoreo simplificado de la obra por evaluar, ya que con este es posible capturar fotografías automáticamente, con una secuencia especificada y controlada desde una página HTML. El montaje para la captura de fotografías se diseñó en el marco del proyecto de investigación *Aplicación de la metodología Time Lapse para el mejoramiento de procesos constructivos mediante simulación en el software Arena*, el cual fue financiado por la Vicerrectoría Académica de la Pontificia Universidad Javeriana [15]; y se compone de tres subsistemas integrados: una unidad central de control con conexión a internet y red wi-fi, una unidad de captura automática de imágenes y un computador de almacenamiento. Puede observarse un esquema en la Fig. 1.

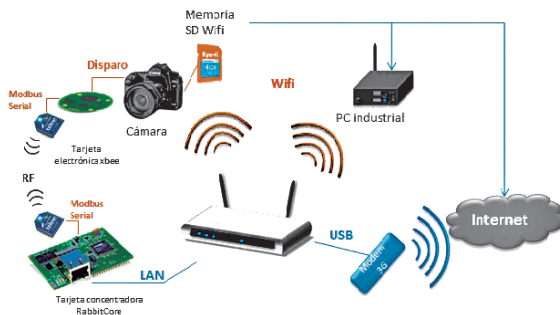


Fig. 1. Esquema del Sistema de Captura Automática de Imágenes
Fuente: [15]

- La cámara fotográfica se ubicó en puntos estratégicos para poder obtener un campo visual adecuado, como se observa a continuación en la Fig. 2.



Fig. 2. Fotografía obtenida con el sistema de captura
Fuente: Autores.

- **Registros manuales:** Adicionales a las fotografías con el sistema automático de captura se obtuvieron fotografías y videos manualmente desde diferentes perspectivas. Esta información resultó útil, ya que se lograron capturar puntos que eran ciegos para el sistema automático de captura, como se puede observar en la Fig. 3.



Fig. 3. Fotografía obtenida manualmente
Fuente: Autores.

- **Visitas a obra y a la oficina de interventoría:** Otra fuente importante de información fueron las visitas realizadas tanto a la obra como a la oficina de interventoría. En estas visitas se observaron los procesos involucrados detalladamente en la construcción de la losa en concreto postensado, y se hicieron consultas tanto a personal de obra como administrativo.

B. Caracterización de Procesos Constructivos

La caracterización de los procesos constructivos consiste en la determinación de los detalles importantes de los procesos por analizar. Esta se realizó en tres partes determinantes: análisis de flujo de trabajo, caracterización de mano de obra y obtención de duraciones.

1) Análisis de Flujo de Trabajo

El análisis de flujo de trabajo consiste en la comprensión del orden y secuencia de las actividades en la obra. Esto significa que a partir del análisis de flujo de trabajo se debe obtener información sintetizada que indique factores como qué actividades son predecesoras de otras y los subprocesos incluidos en los procesos más generales. Como herramientas principales para el análisis de flujo se utilizaron tanto las fotografías obtenidas con el sistema de captura como las obtenidas manualmente. Además, con las visitas de obra y las consultas al personal de esta se confirmó lo obtenido a través de las imágenes. El flujo de trabajo se aprecia en la Fig. 4.



Fig. 4. Actividades dentro del flujo de trabajo
Fuente: Autores.

2) Caracterización de Mano de Obra

Entendiendo la mano de obra como un recurso del proyecto, es importante conocer la capacidad y el flujo de esta en las respectivas actividades. Las cuadrillas de mano de obra varían según el tipo de actividad. Esta caracterización se logró tanto con las visitas de obra como con las visitas a la oficina de interventoría. La disposición de la mano de obra en los subprocesos que hacían parte de la construcción de la losa en concreto postensado fue la siguiente:

TABLA I. RECURSOS CORRESPONDIENTES A MANO DE OBRA

| Actividad | Recursos |
|---|--------------|
| Colocación Cimbra y Camillas de la Losa | 15 oficiales |
| | 15 ayudantes |
| Colocación Acero de Refuerzo | 15 oficiales |
| | 15 ayudantes |
| Colocación Acero de Tensionamiento | 4 oficiales |
| | 4 ayudantes |
| Colocación Formaletas de Borde | 1 oficial |
| | 2 ayudantes |
| Vaciado del Concreto | 15 oficiales |
| | 15 ayudantes |
| Tensionamiento de los Cables | 1 oficial |
| | 2 ayudantes |
| Inyección Lechada de Adherencia en Ductos | 1 oficial |
| | 2 ayudantes |

Fuente: Autores.

3) Obtención de Duraciones

Las duraciones de las actividades caracterizadas son la raíz del modelo de simulación por elaborar. Para cada actividad se obtuvieron múltiples duraciones, de tal manera que se lograran establecer distribuciones de probabilidad para cada conjunto de datos, y así configurar el modelo.

Para obtener duraciones de una actividad repetida fue necesario establecer zonas de trabajo para algunas actividades. Para la colocación de la cimbra y las camillas de la losa se dividió el área total de una losa en diez partes con igual área (sin incluir el núcleo central de ascensores y escaleras), para así poder establecer múltiples duraciones y formar el conjunto de datos para obtener la respectiva distribución de probabilidad. Lo mismo se hizo para la colocación de acero de refuerzo y vaciado del concreto. Las duraciones obtenidas para cada división del área de la placa resultaron de sumar los tiempos obtenidos cada vez que las cuadrillas se dedicaban a alguna de las zonas. Para la colocación del acero de tensionamiento se determinaron duraciones correspondientes al tiempo utilizado en colocar un ducto con todas sus piezas, al igual que la colocación de formaletas de borde; actividad en la cual las duraciones corresponden al tiempo utilizado en la colocación de una pieza teniendo en cuenta los agujeros necesarios para permitir el paso de los cables. Para el tensionamiento de los cables se determinaron duraciones correspondientes al tiempo utilizado en limpiar y tensionar un cable, y para el proceso de inyección, las duraciones corresponden al tiempo utilizado para inyectar lechada por un ducto. Un ejemplo de toma de tiempos se resume en la tabla II.

C. Determinación de Distribuciones de Probabilidad

Estos ajustes probabilísticos se hacen mediante la implementación de la herramienta Input Analyzer del software Arena® [1], la cual a partir de un conjunto de datos numéricos determina la distribución adecuada. Un ejemplo se presenta en la Fig. 5.

D. Elaboración del Modelo Digital

En el modelo elaborado se involucraron los procesos, los recursos (mano de obra) y las entidades correspondientes (cualquier material que dependa de un recurso para ser ejecutado). Inicialmente se crearon curvas de distribución de probabilidad (del conjunto de datos de duraciones) a través de la herramienta Input Analyzer de Arena 14, que permitieran definir aleatoriamente duraciones de los procesos cada vez que se ejecutará el modelo. En la tabla III se presentan las distribuciones de probabilidad a la que se ajustaron los datos tomados en obra.

TABLA II. DURACIONES REGISTRADAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UNA PLACA

| Actividad N° | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|------------------|
| Descripción | <i>Obra Falsa + Camillas</i> | <i>Instalación Acero de Refuerzo</i> | <i>Instalación Tensionamiento</i> | <i>Formaleta Bordes</i> | <i>Vaciado Concreto</i> | <i>Tensionamiento</i> | <i>Inyección</i> |
| Recursos | 3 oficiales | 15 oficiales | 4 oficiales | 1 oficial | 15 oficiales | 1 oficial | 1 oficial |
| | 27 ayudantes | 15 ayudantes | 4 ayudantes | 2 ayudantes | 15 ayudantes | 2 ayudantes | 2 ayudantes |
| Cantidad de obra ejecutada | 79 m2 | 79 m2 | 1 ducto | 1 pieza | 19.8 m3 | 1 ducto | 1 ducto |
| Tiempos | 8.50 horas | 7.25 horas | 0.25 horas | 13 min | 0.7 horas | 2.5 min | 5.2 min |
| | 7.00 horas | 7.20 horas | 0.30 horas | 10 min | 1.3 horas | 2.4 min | 5.0 min |
| | 5.75 horas | 6.75 horas | 0.20 horas | 20 min | 0.9 horas | 2.1 min | 4.8 min |
| | 7.25 horas | 7.50 horas | 0.30 horas | 20 min | 0.8 horas | 2.5 min | 4.5 min |
| | 5.50 horas | 6.80 horas | 0.10 horas | 23 min | 0.7 horas | 2.6 min | 5.0 min |
| | 5.80 horas | 6.00 horas | 0.15 horas | 20 min | 0.8 horas | 2.3 min | 4.6 min |
| | 5.20 horas | 7.50 horas | 0.20 horas | 19 min | 1.1 horas | 2.7 min | 5.5 min |
| | 5.00 horas | 7.00 horas | 0.15 horas | 27 min | 0.7 horas | 2.2 min | 5.5 min |
| | 4.50 horas | 6.25 horas | 0.10 horas | 19 min | 0.9 horas | 2.6 min | 4.5 min |
| | 5.00 horas | 6.25 horas | 0.10 horas | 21 min | 0.6 horas | 2.0 min | 4.0 min |
| Cantidad total del proyecto | 790 m2 | 790 m2 | 222 ductos | 44 piezas | 198 m3 | 222 ductos | 222 ductos |

Fuente: Autores.

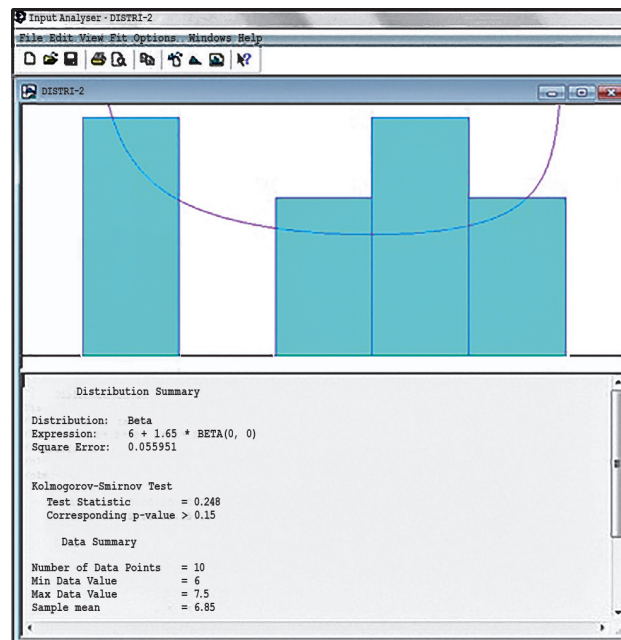


Fig. 5. Resultados Obtenidos con el Input Analyzer

Fuente: [1]

SIMULACIÓN DIGITAL COMO HERRAMIENTA PARA LA GESTIÓN DEL CONOCIMIENTO EN LA CONSTRUCCIÓN DE EDIFICACIONES EN CONCRETO

TABLA III. DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD

| Obra Falsa + Camillas | |
|--------------------------------------|--|
| Distribution: | Lognormal |
| Expression: | $4.09 + \text{LOGN}(1.89, 1.41)$ |
| Square Error: | 0.056342 |
| Instalación Acero de Refuerzo | |
| Distribution: | Beta |
| Expression: | $6 + 1.65 * \text{BETA}(0.604, 0.731)$ |
| Square Error: | 0.055951 |
| Instalación Tensionamiento | |
| Distribution: | Beta |
| Expression: | $0.08 + 0.24 * \text{BETA}(0.888, 1.08)$ |
| Square Error: | 0.010402 |
| Formaleta Bordes | |
| Distribution: | Triangular |
| Expression: | $\text{TRIA}(9.5, 20, 27.5)$ |
| Square Error: | 0.106336 |
| Vaciado Concreto | |
| Distribution: | Erlang |
| Expression: | $0.53 + \text{ERLA}(0.107, 3)$ |
| Square Error: | 0.028189 |
| Tensionamiento | |
| Distribution: | Triangular |
| Expression: | $\text{TRIA}(2, 2.54, 2.77)$ |
| Square Error: | 0.059093 |
| Inyección | |
| Distribution: | Beta |
| Expression: | $4 + 1.65 * \text{BETA}(1.04, 0.955)$ |
| Square Error: | 0.037115 |

Fuente: Autores.

Completado este procedimiento, se daba inicio a la creación del modelo digital, teniendo en cuenta orden de actividades, procesos involucrados, recurso humano y horarios de trabajo. Una imagen de la interfaz del programa se incluye en la Fig. 6.

Con la información obtenida, previa a la creación del modelo de simulación digital, se obtuvo información sobre la disposición de los recursos, la secuencia y características de actividades y la distribución del tiempo en obra.

En cuanto a la disposición de los recursos de mano de obra en el proceso analizado, se encontró que:

- Los procesos con mayor demanda de personal fueron la colocación de la cimbra y las camillas de la losa; la colocación del acero de refuerzo y el vaciado del concreto.
- Los procesos con menor demanda de personal fueron la colocación de las formaletas de borde, el tensionamiento de los cables y la inyección de la lechada de adherencia.
- Los procesos correspondientes al tensionamiento de la losa (colocación de acero, tensionamiento de cables e inyección de lechada de adherencia) fueron ejecutados por personal independiente del contratado por el constructor de la obra, ya que estos procesos son subcontratados con una empresa especializada en concretos preesforzados.
- El personal que ejecutó los procesos de colocación de cimbra y camillas, colocación de acero de refuerzo y vaciado del concreto fue el mismo. Esto quiere decir que el recurso es liberado cada vez que se termina uno de estos procesos.
- El personal que ejecutó los procesos de tensionamiento de cables e inyección de lechada de adherencia fue el mismo. Esto quiere decir que el recurso se liberó cada vez que se terminó uno de estos procesos; aunque esto no es un factor determinante en los días, ya que el principal factor para el inicio son los días necesarios para que el concreto alcance su resistencia y permita la ejecución de las actividades, según lo especificado por el ingeniero estructural.

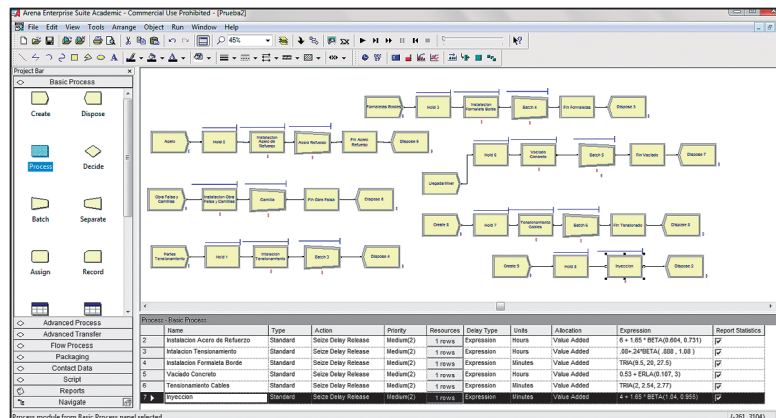


Fig. 6. Interfaz del software Arena 14

Fuente: [1]

En cuanto a la secuencia de las actividades analizadas, se encontró que:

- El proceso que más tardó en completarse fue la colocación del acero de refuerzo.
- El proceso que menos tardó en completarse fue el tensionamiento de los cables del postensado.
- La colocación del acero de refuerzo y del acero de tensionamiento no se inició hasta que no se terminó por completo la colocación de la cimbra y las camillas de la losa.
- La colocación de las formaletas de borde no se inició hasta que se completó la instalación del acero de refuerzo. Además, los agujeros necesarios para su colocación (producto de la presencia de los cables del tensionamiento) se iban haciendo a medida que se iba colocando la formaleta.
- El proceso de tensionamiento de los cables incluía: limpieza necesaria del cable para garantizar la adecuada adherencia a las mordazas del gato hidráulico y posteriormente el tensionamiento del mismo.
- Los procesos de colocación del acero de refuerzo y colocación de acero de tensionamiento se realizaron de manera paralela una vez terminada la colocación de la cimbra y camillas de la losa.
- La ruta crítica del proceso se compone de los siguientes procesos representados en la Fig. 7. Fue obtenida a partir de la información suministrada por el proyecto.



Fig. 7. Procesos que componen la ruta crítica
Fuente: Autores.

1) Evaluación de alternativas

Adicionales al modelo original se evaluaron las siguientes alternativas de mejora, cambiando factores en el proceso constructivo real con el objetivo de identificar el impacto en tiempos de ejecución del proyecto:

a. *Alternativa 1:* permitir el inicio de la colocación del acero de refuerzo y de tensionamiento una vez se haya completado tan solo el 20 % del área total de la losa en cimbrado y camillas, considerando un aumento de personal de 15 cuadrillas adicionales para poder realizar los procesos simultáneamente.

b. *Alternativa 2:* cambiar la actividad predecesora de la colocación de las formaletas de borde. Originalmente se esperaba a que se terminara la colocación del acero de refuerzo para iniciar la colocación de las formaletas de borde, cuando lo que es verdaderamente determinante es la terminación de la colocación del acero de tensionamiento. Esto se debe a la necesidad de permitir el paso de los cables del tensionamiento a través de la formaleta, por medio de agujeros.

c. *Alternativa 3:* consistió en hacer los agujeros necesarios para las formaletas de borde con anticipación a la colocación de esta. Originalmente, los agujeros de estas formaletas se hicieron justo antes de colocar cada pieza de la formaleta.

d. *Alternativa 4:* la cuarta alternativa evaluada consistió en modificar la secuencia del proceso de tensionamiento de los cables. Originalmente se hacía la limpieza necesaria para un cable, seguida del tensionamiento de este mismo; mientras que en esta alternativa se evaluó el procedimiento realizando la limpieza de todos los cables inicialmente, para luego sí aplicar la tensión necesaria a cada uno de los cables.

Adicionalmente se evaluó un escenario adicional, que consistía en la combinación de las 4 alternativas.

III.RESULTADOS

Con las alternativas evaluadas se observaron las distintas duraciones totales y su comparación respecto al modelo original. La alternativa 1 es la más determinante de todas, ya que en esta se intervienen actividades de duraciones extensas.

Con la combinación de todas las alternativas se logró reducir la duración total del proceso en más de 8 días. Los resultados se presentan en la Fig. 8.

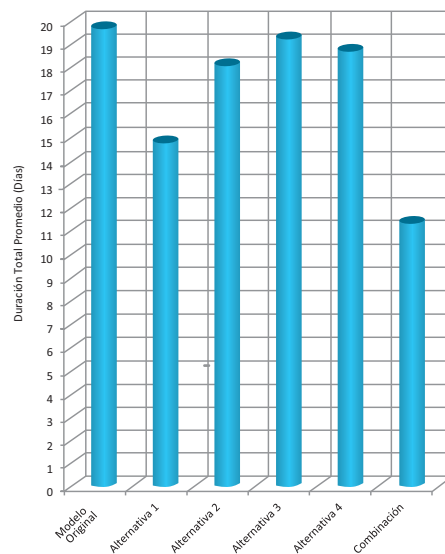


Fig. 8. Duración total promedio por alternativa
Fuente: Autores.

IV. CONCLUSIONES

- La simulación digital es una herramienta eficiente para gestionar el conocimiento adquirido con la experiencia en proyectos de construcción y poder implementar lecciones aprendidas en tiempos futuros. A través de esta se puede evaluar cualquier tipo de procesos constructivos e identificar cuáles son los factores principales que afectan la productividad en construcción. Además, el sistema electrónico de captura automática de fotografías es una herramienta que permite hacer un seguimiento constante a la obra. De esta manera se tiene un panorama general de lo que sucede en esta sin la necesidad de permanecer tiempo completo.
- Los resultados arrojados por el modelo de simulación digital en Arena 14 estuvieron muy cercanos a la realidad, difiriendo de la duración real obtenida en menos de 1,5 días. Esto comprobó además que la calidad de un modelo de simulación está determinada por los datos de entrada, que en este caso fueron conjuntos de datos de mediciones reales, vinculados al modelo por medio de distribuciones de probabilidad.
- En el proyecto de construcción analizado, el factor con mayor incidencia en la duración total de este es la capacidad y disposición de la mano de obra. En la mayoría de los procesos no se presentaron problemas por llegada de material a la obra, exceptuando el vaciado del concreto, en el cual se desperdició algo de tiempo esperando por la llegada del concreto a obra.
- La supervisión en obra debe fortalecerse para garantizar los rendimientos deseados. Constantemente se identifican tiempos no contributivos que podrían evitarse si se contase con mejor planeación por parte de los contratistas y mayor supervisión. Estos comportamientos terminan afectando de manera directa la economía del proyecto.
- La colocación del acero de refuerzo en la losa es una actividad que demanda mucho tiempo en relación con otras actividades del proceso (7 días aproximadamente). Por esto, el inicio de esta actividad sin haber completado el total del área de la losa puede colaborar a cumplir con los plazos establecidos.
- El tipo de formaleta utilizada para losas postensadas no es igual a la formaleta de una placa normal, debido a la necesidad de perforar la formaleta para permitir el paso de los cables. Esto resulta en un proceso más retardado, por lo cual es recomendable preparar la formaleta con

anticipación, para que la perforación de esta no demore drásticamente dicho proceso. La colocación de esta formaleta depende en exclusiva de la finalización de la colocación de los cables de acero y ductos del tensionamiento, por lo cual se puede iniciar posterior a esto y no necesariamente posterior a la colocación del acero de refuerzo. Instalar la formaleta al finalizar la colocación del tensionamiento aumenta la holgura de dicho proceso.

- La limpieza previa al tensionamiento de todos los cables resulta en una reducción del tiempo empleado en dicho proceso de 3 horas aproximadamente.

REFERENCIAS

- [1] Rockwell automation, "Arena Simulation Software by Rockwell Automation", in *Arena Simulation software*, 2014. [En línea]. Disponible en: http://www.arenasimulation.com/Arena_Home.aspx. [Accedido: 22-jul-2014].
- [2] L. F. Botero, *Construcción Sin Pérdidas*, 2.ª ed., 2006.
- [3] D.W. Halpin y L.S Riggs. "Planning and Analysis of Construction Operations", Canada: John Wiley & Sons, Inc. 1992.
- [4] M. Lu, "Simplified Discrete-Event Simulation Approach for Construction Simulation", *J. Constr. Eng. Manag. - Asce-*, vol. 129, no. 5, 2003.
- [5] R. Sacks and A. Esquenazi, "LEAPCON: Simulation of Lean Construction of High-Rise Apartment Buildings", *J. Constr. Eng. Manag. -Asce-*, vol. 133, no. 7, 2007.
- [6] W.-H. Chang and M. Lu, "Materials Handling System Simulation in Precast Viaduct Construction: Modeling, Analysis, and Implementation", *J. Constr. Eng. Manag. -Asce-*, vol. 134, no. 4, 2008.
- [7] J. A. Sosa, J. R. Baeza y C. Arcudia, "Modelos para la simulación computarizada del proceso constructivo de la losa prefabricada L-18", *Ing. Univ.*, vol. 11, no. 1, Oct. 2010.
- [8] L. F. Ballesteros, *Estudios de productividad basados en tecnologías de diagnóstico y simulación digital*, Universidad de los Andes, 1998.
- [9] L. Navarro, *Simulación Digital de Procesos Constructivos*, Universidad de los Andes, 2001.
- [10] J. E. Córdoba y M. Y. Delgado, *Simulación Digital de Procesos Constructivos*, Universidad de los Andes, 2005.
- [11] A. Gómez, "Simulación de Procesos Constructivos", *Rev. Ing. Constr.*, vol. 25, no. 1, pp. 121-141, Mar. 2010.
- [12] J. D. Echeverry y M. X. Giraldo, *Mejoramiento de procesos constructivos de una edificación a partir de Simulación Digital y videos Time Lapse*, Pontificia Universidad Javeriana, 2012.
- [13] L. F. Botero y H. Acevedo, "Simulación de operaciones y línea de balance", *Ingeniería y Ciencia*, pp. 29-45, 2011.
- [14] L. F. Botero y H. Acevedo, "Simulación digital en un proyecto de construcción en Colombia" *Revista Universidad EAFIT*, vol. 45, no. 155, pp. 45-59, 2009.
- [15] A. Gómez, J. D. Echeverry, M. X. Giraldo Palma, C. Otálora Sanchez y M. L. Cano Morales, "Mejoramiento de Procesos Constructivos a partir de un Módulo Programable para captura de imágenes y Simulación Digital", *Rev. Ing. Constr.*, vol. 27, no. 2, pp. 35-53, Ago. 2012.