

Simulación digital de procesos de construcción de estructura en concreto: casos de estudio práctico en Bogotá

Digital simulation of concrete structure construction: practical case-study in Bogota

Diego Echeverry*¹, Holmes Páez**, Harrison Mesa*

* Universidad de los Andes, Bogotá D.C. COLOMBIA

** Constructora NORCO S.A., Bogotá D.C. COLOMBIA

Fecha de recepción: 10/ 06/ 2008
Fecha de aceptación: 25/ 07/ 2008
PAG. 64 - 71

Resumen

Se están desarrollando actividades de simulación digital de procesos encaminadas a modelar la construcción de la estructura de muros y losas en concreto en proyectos inmobiliarios de una firma constructora colombiana. En un primer proyecto se generaron modelos que permitieron emitir recomendaciones prácticas para reducir el tiempo total de construcción. Actualmente se está concluyendo otro proceso de modelación aplicado en un proyecto nuevo de la misma firma constructora. Con estas herramientas de simulación se logra poner en manos de los planeadores de proyectos un instrumento que permite evaluar diferentes escenarios de manera probabilística, permitiendo así una mejor toma de decisiones ante condiciones de incertidumbre.

Palabras Clave: Procesos constructivos, simulación digital, simulación de Monte Carlo

Abstract

Activities are in progress to develop digital simulation of the construction of structural walls and slabs made of concrete, in building projects of a Colombian construction firm. In an initial project, the models that were generated allowed to produce recommendations to reduce the total construction time. At present another simulation process is concluding, applied to two new construction projects of the same firm. With these simulation tools the planning staff can evaluate different scenarios with a probabilistic approach, enabling an improved decision making in uncertain conditions.

Keywords: Construction processes, digital simulation, Monte Carlo simulation

1. Introducción

Una parte importante de la planeación de un proyecto es aquella que se enfoca en los procesos constructivos en obra. Este proceso de planeación tradicionalmente se alimenta con la experiencia de los involucrados y con información disponible de procesos similares, realizados en el pasado. Las herramientas que dan apoyo a esta planeación tradicionalmente incluyen diagramas de flujo, redes CPM, y otras herramientas complementarias, y se fundamentan en análisis determinísticos.

Sin embargo, estas herramientas tradicionales adolecen de desventajas que las limitan en sus posibilidades de pronóstico. La realidad de los procesos indica que existe una alta variabilidad en el desarrollo

de las actividades que componen a los procesos constructivos. Igualmente, es importante contar con adecuados instrumentos para toma de decisiones; un modelo debidamente formulado, desarrollado y validado permite tomar decisiones sobre la asignación de recursos al proceso puesto que permite pronosticar con suficiente aproximación qué sucede con el proceso cuando hay cambios en alguna de las variables de entrada (frentes de trabajo, asignación de recursos, por ejemplo).

2. Antecedentes y conceptos básicos

2.1 Conceptos básicos de simulación digital

La simulación digital aplicada a procesos

¹ Autor de correspondencia / Corresponding author:
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.
Teléfono: 57-1-3324314, E-mail: dechever@uniandes.edu.co

constructivos modela el estado del sistema (proceso constructivo) a lo largo del tiempo, con base en una aproximación discreta. Es decir, se modelan eventos específicos que ocurren en el tiempo, como lo son principalmente el inicio o el final de una actividad del sistema por parte de un recurso. Esto se conoce como simulación discreta, controlada por eventos (“event-driven, discrete simulation”). A continuación se presentan algunas definiciones de conceptos claves de simulación digital basados en (Banks et al., 2000) y (Kelton et al., 2004).

- i. Estado de las variables del sistema: este es el conjunto de toda la información necesaria para definir qué está sucediendo en un determinado punto en el tiempo. El estado de las variables a través del tiempo es el objetivo del análisis del sistema. Un ejemplo de esto es el tiempo promedio que debe esperar un trabajador de la construcción para iniciar una actividad determinada.
- ii. Entidad: es la representación de un objeto que debe ser explícitamente definido. Una entidad puede moverse por el sistema, un ejemplo de esto son los trabajadores de la construcción que se mueven de una actividad constructiva a otra. Una entidad estática es definida por su inmovilidad en una determinada actividad del sistema, por ejemplo, una torre grúa para el transporte vertical y horizontal de un determinado material.
- iii. Atributo: es una propiedad de una entidad. La edad de los trabajadores, su cargo, su especialidad y su experiencia son atributos de las entidades llamadas “trabajadores de la construcción”. Es muy importante la adecuada definición de los atributos de las entidades, ya que esta en algún punto de la simulación puede definir los movimientos de las entidades en el sistema que se modeló.
- iv. Recursos: son entidades que ofrecen servicios a las entidades que se mueven por el sistema. Un almacenista es un ejemplo de recurso para los trabajadores de la construcción, ya que presta el servicio de almacenamiento de equipos y herramientas necesarios para desarrollar los diferentes procesos constructivos.
- v. Actividades: son cada uno de las subdivisiones de lo que se hace en el sistema. Cada actividad tiene incorporados una duración probabilística, unos recursos asociados a la actividad y una función que

determina la forma como circularán las entidades en la actividad. Un ejemplo de actividad en un sistema de construcción es la fundición de concreto en un área determinada. La duración de esta actividad puede estar determinada por una distribución de probabilidad triangular, algunos de los recursos necesarios para realizar la actividad son la torre grúa para el transporte del concreto y el equipo para el afinado de las superficies. La entidad básica en esta actividad es el concreto y su forma de procesamiento es una cola FIFO (“first-in-first-out”), es decir, el primer concreto que es transportado por la torre grúa es el primero en ser instalado en la formaleta (encofrado) que está dispuesta para la actividad como un recurso.

- vi. Evento: es una acción que ocurre en un punto determinado en el tiempo y que cambia el estado del sistema.
- vii. Simulación de modelos con eventos discretos: en síntesis es aquella en la cual el estado de las variables que incorpora el sistema cambia en puntos determinados en el tiempo debido a la ocurrencia de un evento.
- viii. Fases de la realización de un modelo: el plan para crear la simulación de un sistema, inicia con la formulación del problema a resolver. Se determina la necesidad, el alcance y los objetivos que se desean lograr con la simulación. Es importante hacer un inventario general de la información que estaría disponible para el trabajo posterior, ya que esto en gran parte determinará la precisión a la que se llegará con los resultados. Una vez planteada la formulación del problema, los objetivos y una estrategia general de trabajo, partiendo de la base de que el problema al que se enfrenta es candidato seguro para una simulación, se deben realizar dos actividades en paralelo, estas son: la conceptualización del modelo y la recolección de datos. Seguidamente se realiza la codificación del modelo y se efectúa una verificación y validación del mismo. Si en el anterior paso no se obtienen los resultados acordes con la precisión requerida, se hacen de nuevo iteraciones de recolección de datos y modificaciones al modelo hasta obtener unos resultados adecuadamente validados. Posteriormente, con el modelo definitivo se procede a realizar las corridas de la simulación, una vez se ha seleccionado el nivel de confianza apropiado, teniendo en cuenta que el tamaño del

error en los datos que se está dispuesto a tolerar es directamente proporcional a qué tan crítico es el trabajo que se está realizando. Finalmente, se realiza la documentación necesaria de los resultados de la simulación y se genera un reporte final para efectuar la implementación de la solución propuesta al problema.

2.2 Antecedentes en simulación digital de procesos constructivos en Universidad de los Andes

Hacia mediados de los 90's se inició trabajo en la simulación de procesos constructivos en la Universidad de los Andes, con los trabajos de (López, 1996) y (Ballesteros, 1998). Estos trabajos se fundamentaron en la herramienta Micro Cyclone© desarrollada por D. Halpin, descrita en su libro seminal sobre planeación de procesos (Halpin, 1992). Posteriormente hubo un trabajo realizado por (Navarro, 2001) apoyado en Stroboscope©, plataforma desarrollada por J. Martínez y que puede considerarse como un descendiente directo de Micro Cyclone© (Martínez, 1996).

2.3 Metodología seguida

Para los dos proyectos presentados en el presente artículo se siguió una metodología consistente en las siguientes actividades principales:

- i. Documentación general de los procesos constructivos: la primera tarea consiste en hacer un seguimiento detallado a los procesos constructivos seleccionados, por medio de observación directa, fotografía y video.
- ii. Elaboración de modelos conceptuales: los procesos observados son modelados con base en diagramas de flujo que permiten representarlos competentemente.
- iii. Recolección de datos y obtención de estadísticas de duraciones y rendimientos: se toman mediciones de manera sistemática de tiempos y rendimientos de las cuadrillas y equipos realizando las actividades que se quieren modelar.
- iv. Codificación de los modelos en la plataforma seleccionada: los modelos conceptuales son plasmados en la plataforma de simulación digital seleccionada, en este caso Arena©.
- v. Validación del modelo frente a los procesos reales en obra: es fundamental validar el modelo producido contra los datos reales obtenidos en obra; solamente después de una validación adecuada puede ser

considerado el modelo como utilizable.
vi. Utilización del modelo para proponer alternativas que mejoren la eficiencia.

3. Modelación del primer proyecto

El primer modelo se enfocó en la construcción de un proyecto inmobiliario en la ciudad de Bogotá. La obra consta de 192 apartamentos de vivienda de estrato medio, cada uno con un área de 72 m², el sistema constructivo es en muros y losas estructurales en concreto, torres de 6 pisos de altura y 4 apartamentos por piso. En la Figura 1 se muestra una torre típica del proyecto de construcción modelado. Su estructura se encuentra construida en muros estructurales hasta el piso 4 y la losa de entrepiso hasta el piso quinto. En el momento en que fue tomada la foto (octubre 31 de 2006) se estaba procediendo a instalar la malla de refuerzo estructural.



Figura 1. Torre típica del proyecto de construcción modelado

En el caso de este proyecto se tiene necesidad de reducir los tiempos de construcción en la obra. Esta tiene inconvenientes con el transporte de la formaleta (encofrado), tiempos no contributivos relativamente altos y falta de materiales en el sitio de las actividades, entre otros, que han afectado negativamente el cumplimiento de la programación de obra inicial.

Se determinó por medio de toma de datos de duración de actividades y observaciones del sistema, que uno de los puntos críticos era el transporte de formaleta internamente en la obra, ya que debido a que este equipo era alquilado se tenía la prevención de que se debía utilizar la totalidad del tiempo, es decir, aunque se tuviera que transportar de una torre hacia otra por medio de la

torre grúa y perder tiempo valioso en ese proceso, se realizaba con el fin de que en ningún momento de detuviera el uso de la formaleta.

El segundo punto para mejorar en el sistema se identificó por medio de la medición de los tiempos de arribo del concreto transportado por mezcladora (“mixer”) desde una planta productora de concreto cercana. Se detectó una marcada impuntualidad de la llegada de material, que se convertía frecuentemente en un caso de retraso de las actividades de fundición de muros y losas estructurales. El anterior análisis se realizó con el fin de asegurarse de las ventajas que traería una simulación del sistema, confirmándose una excelente oportunidad para que por medio de esta metodología se llegara a plantear escenarios de mejoramiento que influyeran notablemente en la reducción de tiempos de construcción en la obra. El plan general consistió en simular el sistema tal y como es realmente, con el fin de obtener los indicadores de desempeño de cada una de las variables del modelo y posteriormente crear modelos alternativos basados en los escenarios de mejoramiento planteados.

Entre los meses de junio y octubre de 2006 se recolectaron los datos que alimentaron el sistema. Los datos que se tomaron fueron de dos tipos: de tiempos de duración de actividades de construcción y de costos directos asociados a esas actividades. Con el esquema definitivo de procesos constructivos se tomaron muestras de tiempos para cada una de las actividades, refinando con el tiempo las formas de tomar las mediciones, hasta llegar a unos procedimientos que reflejaban con precisión las duraciones probabilísticas reales que tenía el sistema. Los costos asociados al modelo son principalmente: costo de arrendamiento de la formaleta, costo del concreto, costo de arrendamiento de torre grúa y costos de mano de obra.

Para la verificación y validación de los datos se seleccionaron puntualmente tres torres de la obra, ya que por su avance, eran las candidatas más apropiadas para obtener el objetivo esperado. El proceso de verificación y validación se realizó como lo propone (Banks 2000) de forma iterativa hasta llegar a un modelo con suficiente cuerpo como para imitar de forma muy precisa el verdadero comportamiento del sistema modelado. Como se presenta más adelante en los resultados de la simulación, se llegó a un grado de precisión bastante alto, todo esto formalmente validado con lo que se observó en la realidad de la obra de construcción.

En la Figura 2 se presenta un esquema general del sistema modelado experimental. La simulación se compone de las entradas, que en este caso son las

entidades: concreto, acero y formaleta, que se van a mover por el sistema. Existe una serie de actividades para el procesamiento de las entidades que ingresan y salen de cada una de ellas. Adicionalmente, para el desarrollo de cada actividad se cuenta con unos recursos necesarios, estos son: equipo de construcción, equipo de transporte horizontal y vertical y cuadrillas de trabajo (mano de obra). Finalmente se obtiene el producto terminado de la serie de procesos constructivos, que en el sistema se representan como unidades de vivienda (apartamentos).

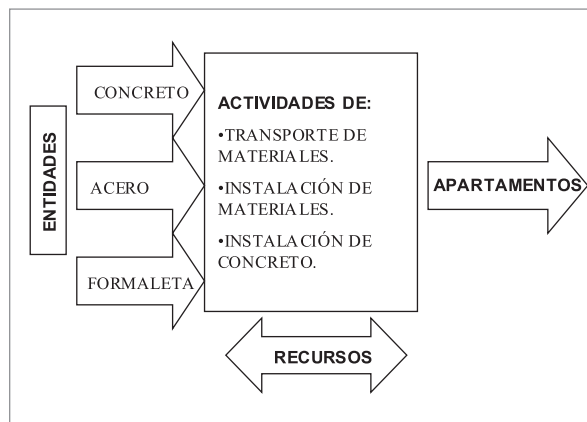


Figura 2. Esquema general del sistema modelado experimental

En la Tabla 1 se presenta la comparación de los resultados obtenidos con la modelación y de los procesos reales desarrollados en obra para la torre de prueba. Se realizaron 35 corridas del modelo y se promediaron, para comparar dicho promedio los resultados que se dieron en la realidad de la obra.

Tabla 1. Resultado de principales indicadores de desempeño del modelo experimental

| INDICADORES DE DESEMPEÑO | Resultados del modelo | | | Resultado de la obra de construcción real |
|---|-----------------------|-----|-----|---|
| | Promedio simulado | MIN | MAX | |
| Producción total de muros estructurales en concreto (m ³) | 890 | | | 890 |
| Producción total de losas de entrepiso en concreto (m ³) | 670 | | | 670 |
| Producción semanal de muros estructurales en concreto (m ³) | 44 | 27 | 56 | |
| Producción semanal de losas de entrepiso en concreto (m ³) | 37 | 14 | 44 | |
| Tiempo total de simulación (días) | 118 | | | 126 |
| Porcentaje de tiempo de ocupación de la formaleta para muros | 70% | | | 66% |
| Porcentaje de tiempo de ocupación de la formaleta para losas | 75% | | | 71% |
| Porcentaje de tiempo de ocupación de las cuadrillas de muros | 78% | | | 72% |
| Porcentaje de tiempo de ocupación de las cuadrillas de losas | 71% | | | 68% |

Como se puede observar, el modelo en su versión validada presenta resultados muy similares a la realidad comprobada con las torres ejecutadas. Con este modelo se generan varios escenarios de producción, para así llegar a recomendar las estrategias para minimizar duraciones del proyecto. Las estrategias de producción propuestas se encaminan principalmente a reducir el trasiego de la formaleta (encofrado) evitando transportarla de una torre en donde se ha utilizado, a una torre diferente. Otra estrategia propuesta se encamina a concertar de mejor manera los despachos a obra con el proveedor de concreto premezclado.

4. Modelación del segundo proyecto

Para el desarrollo de la investigación, se identificó un proyecto inmobiliario en la ciudad de Bogotá, que en su momento se encontraba en el inicio de la fase de construcción, lo que permitió ir identificando problemas en el proceso constructivo de los muros en concreto. El proyecto está conformado por 7 torres de cinco pisos, para un total de 140 apartamentos. La Figura 3 presenta una de las torres del proyecto en una fase intermedia de la construcción de su estructura.



Figura 3. Torre típica en su fase de construcción de estructura

La Figura 4 muestra una distribución típica de la parte estructural (muros en concreto) para uno de los pisos. La formaleta metálica que se emplea es de tipo manportable, con la posibilidad de fundir el concreto de la estructura de muros y losas de entrepiso monolíticamente.

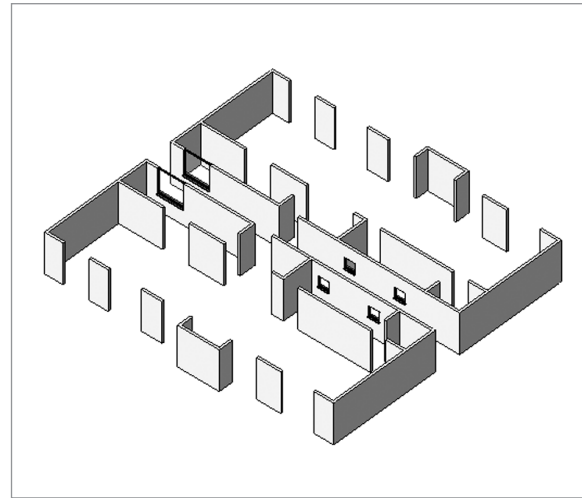


Figura 4. Distribución muros en concreto

Dentro de este proceso se identificó el problema de la utilización óptima de personal, lo que no permite alcanzar los rendimientos requeridos.

4.1 Proceso Real y Modelo de Simulación

El modelo simuló el proceso real desde el desencofrado hasta el armado y nivelación de la formaleta; no se consideran las actividades preliminares al desencofrado y el proceso de vaciado. Esta consideración se realizó porque cada una de estas actividades representa un sistema real aparte al que se definió previamente y el objeto como tal del modelo es simular específicamente el proceso de montaje de la formaleta.

Las actividades que se identificaron y que sirvieron como base para la elaboración del modelo de simulación son las siguientes:

- i. Actividad de desencofrado: se realiza manualmente con la ayuda de una barra o un saca-latas cuando es del caso
- ii. Actividad de transporte: la realiza una persona cuando se está en el mismo piso, pero cuando el transporte se realiza de un piso a otro es necesario que trabajen dos personas
- iii. Actividad de limpieza y aplicación de desmoldante: consiste en la remoción del concreto adherido a la formaleta y la aplicación de desmoldante para evitar que éste se adhiera.
- iv. Actividad de armado: esta actividad se divide en el armado de formaleta de muro y formaleta de placa

v. Nivelación: está dividida en dos procesos; una primera parte consiste en el plomo del muro y la segunda parte la nivelación como tal, que la realiza el ejero (trabajador a cargo de la ubicación de ejes).

La Figura 5 muestra de manera gráfica el proceso constructivo modelado, el cual incorpora las actividades arriba enunciadas.

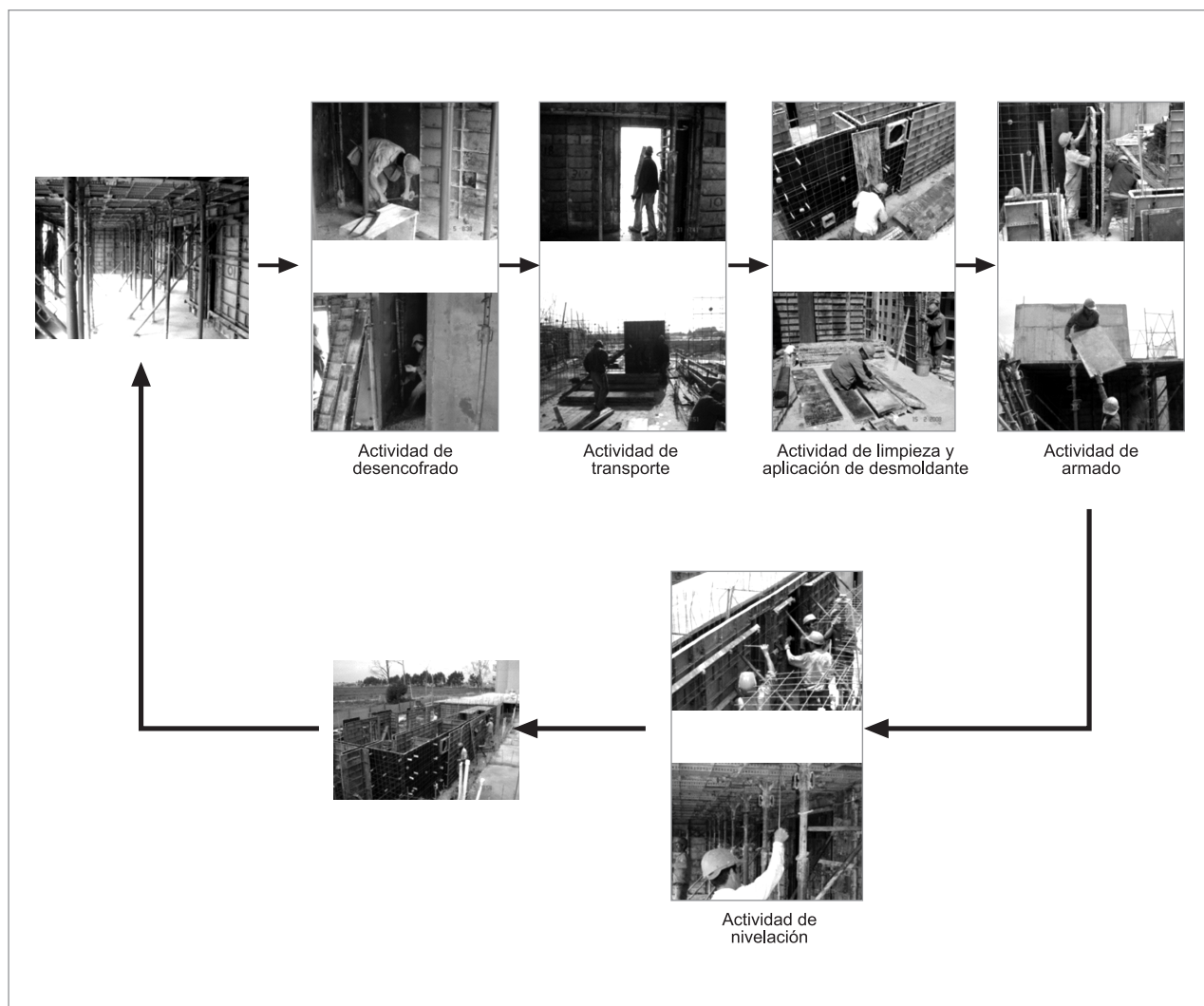


Figura 5. Proceso real

4.2 Propuesta de mejoramiento apoyada en el modelo

Con la validación del modelo de simulación se da paso para empezar a desarrollar escenarios de mejoramiento para el proceso de montaje de la formaleta. Con estos escenarios se busca reducir el tiempo total del proceso, tratando entonces de lograr el rendimiento deseado, construir dos apartamentos diarios.

Se planteó una nueva distribución del personal y una secuencia de ejecución diferente, buscando mejorar y organizar el proceso de montaje de formaleta. Esta secuencia de ejecución, en comparación con la del modelo original, difiere en el sentido que no busca desencofrar una cantidad inicial de formaleta para empezar con la actividad de armado, sino que todas las actividades se comienzan a realizar al mismo tiempo. Es decir, a medida que se va desencofrando se transporta, se limpia, se aplica el desmoldante y finalmente se arma. Con el planteamiento de esta nueva secuencia, se busca reducir el stock (apilamiento) de formaletas para armar, con el fin de tener una mejor organización de la zona de trabajo y evitar la confusión de los trabajadores a la hora de ubicar el tamaño de formaleta requerido.

Con esta nuevo planteamiento para mejorar el proceso de montaje de la formaleta, se pronostica con el modelo una reducción de 2.23 horas, es decir que el proceso pasa de un tiempo promedio de 12.50 horas con una desviación estándar de 0.42 horas, a un tiempo promedio de 10.27 horas con una desviación estándar de 0.2496 horas. Con este resultado se convenció a los tomadores de decisión en el proyecto de generar un proceso real de prueba, el cual se llevó a cabo a fines de mayo de 2008. Con la prueba en obra se obtuvieron resultados positivos y negativos, los cuales muestran que la realidad de los proyectos es mucho más compleja de lo que puede modelarse, pero que de todas formas hay ganancia en generar modelos digitales que permiten buscar alternativas de mejoramiento.

A continuación se resaltan algunos de los hallazgos que surgen de esta oportunidad de observar la prueba en obra de los planteamientos sugeridos con el modelo.

- i. Mejoramiento de la productividad del proceso: se llegó a un mejoramiento de la productividad en el proceso, aunque por factores descritos más adelante, no tan bueno como el pronosticado por el modelo
- ii. Organización zona de trabajo: la buena organización de las zonas de trabajo de la obra, es un punto clave, no solo a la hora de ejecutar un buen trabajo sino

para evitar posibles accidentes. Todo esto recae en un buen sistema de planeación de las actividades donde los trabajadores se apropien de sus lugares de trabajo.

- iii. Énfasis en la especialización del trabajo: uno de los principales inconvenientes que se encontró fue la falta de la organización interna, haciendo que todos los trabajadores participaran en diferentes actividades y no se presentara claridad por parte de ellos a la hora de realizar específicamente una actividad.
- iv. Organización del grupo de trabajo: es claro que al tener una especialización del personal en sus actividades, se facilita la conformación de los grupos de trabajo, lo que hace más fácil y organizado el desarrollo de cualquier actividad.
- v. La falta de herramientas: esencialmente se puede hablar de la falta de barras, saca latas y corbatas, obligando al trabajador a hacer desplazamientos innecesarios para la búsqueda de éstas.
- vi. Impuntualidad del trabajador: como es normal en cualquier proyecto de construcción la impuntualidad es un factor que siempre está presente, ya sea por factores internos o externos al proyecto.
- vii. Cuadrillas incompletas: Debido a la falta de personal por lo señalado en el comentario anterior, no se logró trabajar en un 100% como se había planteado en el modelo de simulación.
- viii. Cumplimiento de algunos tiempos con base en lo establecido en el modelo de simulación: como consecuencia de la falta de personas, no se logró cumplir con las horas de inicio establecidas en el modelo de simulación.
- ix. Dentro de este punto, cabe rescatar que se logró cumplir de una manera aproximada con el inicio de las actividades de nivelación (plomero) y armado de formaleta de placa. El resto de las actividades sufrieron retrasos con respecto al pronóstico del modelo.

Finalmente, se logró una mejora del proceso, pero esa mejora llegó solamente a un 90% del pronóstico realizado con el modelo.

5. Conclusiones

La simulación digital controlada por eventos ofrece herramientas interesantes para modelar procesos que por su naturaleza son probabilísticas. Con procesos



rigurosos de modelación, los cuales incluyen la validación de los modelos producidos, es posible apoyar la toma de decisiones para la producción en obra de los proyectos de construcción. Por ahora la investigación se ha enfocado en procesos críticos del proyecto, como la construcción de estructuras en concreto, ya que esta actividad representa los mayores costos directos dentro del proceso, pertenece a la ruta crítica de las obras de construcción y se ha comprobado una muy buena precisión en los modelos realizados.

6. Agradecimientos

Los autores agradecen a la firma ConConcreto S.A. la oportunidad que les ha brindado de desarrollar esta investigación en sus proyectos de vivienda. Los autores expresan su gratitud al Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de los Andes por el apoyo recibido a lo largo de los proyectos descritos en el artículo.

7. Referencias

- Ballesteros L.F. (1998), Estudios de productividad basados en tecnologías de diagnóstico y simulación digital, Tesis de Magíster, Depto. de Ing. Civil y Ambiental, Universidad de los Andes.
- Banks J., J. Carson, B. Nelson, y D. Nicol. (2000), Discrete-Event System Simulation, 3rd Ed., Prentice-Hall, New Jersey.
- Halpin D. y L. Riggs (1992), Planning and analysis of construction operations, Wiley.
- Kelton D., R. Sadowski, D. Sadowski (2004), Simulation with Arena. 3rd Ed., McGraw-Hill, Boston.
- López J.E. (1996), Control integral de calidad del concreto compactado con rodillo, Tesis de Magíster, Depto. de Ing. Civil y Ambiental, Universidad de los Andes.
- Martínez J. (1996), STROBOSCOPE State and Resource Based Simulation of Construction. ProcEsses, University of Michigan.
- Navarro L. (2001), Simulación Digital de Procesos Constructivos. Tesis de Magíster, Depto. de Ing. Civil y Ambiental, Universidad de los Andes.
- Páez H. (2007), Simulación Digital para el Mejoramiento de la Planeación de Procesos Constructivos. Tesis de Magíster, Depto. de Ing. Civil y Ambiental, Universidad de los Andes.