

# MODELO PARA SIMULACIÓN COMPUTARIZADA DEL PROCESO CONSTRUCTIVO DE LA LOSA PREFABRICADA L-18\*

COMPUTER SIMULATION MODEL FOR THE CONSTRUCTION PROCESS  
OF PREFAB FLAGSTONE L-18

*Jorge Alejandro Sosa Canto\*\**  
*Julio Rodrigo Baeza Pereyra\*\*\**  
*Carlos Enrique Arcudia Abad\*\*\*\**

**Resumen:** el constante desarrollo en la industria de la construcción demanda el estudio continuo de nuevas alternativas constructivas que permitan el uso eficiente y efectivo de los recursos. El presente trabajo se enfocó en la elaboración de los modelos gráficos de operación para los procesos identificados en la fabricación del sistema de techumbre L-18. Se observaron y analizaron las actividades del sistema constructivo y se agruparon en procesos individuales, los cuales fueron la base para elaborar el modelo de simulación del sistema constructivo. Las actividades registradas para la creación de este modelo se basaron sólo en el proceso de ensamblaje del sistema en obra.

**Palabras clave:** construcción industrializada, simulación por computador, simulación por computadores digitales, proceso constructivo.

---

\* *Fecha de recepción: 29 de agosto de 2006. Fecha de aceptación para publicación: 6 de septiembre de 2006. Este artículo se deriva del proyecto de investigación denominado "Simulación estocástica de rendimientos de mano de obra en procesos de construcción", financiado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (número de proyecto 33335-U).*

\*\* *Ingeniero Civil y Máster en Ingeniería de Construcción, Universidad Autónoma de Yucatán. Profesor, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, México. Correo electrónico: ming\_jasc@hotmail.com*

\*\*\* *Ingeniero Civil y Máster en Ingeniería de Construcción, Universidad Autónoma de Yucatán. Ph.D. en Ingeniería Civil, Worcester Polytechnic Institute. Profesor, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, México. Correo electrónico: bpereyra@uady.mx*

\*\*\*\* *Ingeniero Químico, Especialista en Docencia y Máster en Educación Superior, Universidad Autónoma de Yucatán. Doctor en Ciencias Técnicas, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. Profesor Investigador Titular, Universidad Autónoma de Yucatán, México. Correo electrónico: aabad@uady.mx*

**Abstract:** the constant development in the construction industry demands the continuous study of new constructive alternatives to allow the most efficient and effective use of the resources. The present work is aimed to elaborating graphical models for operation processes in manufacturing of the L-18 precast slab system. The activities of this construction system were observed and analyzed and grouped in individual processes, which were the basis to elaborate a simulation model. The activities registered for the creation of this model were solely based on the assembly operations. The characteristics of the observed project that used this system are described and taken into account for the simulation of the construction system.

**Key words:** industrialized building, computer simulation, digital computer simulation, constructive process.

## 1. INTRODUCCIÓN

El sistema de losa de vigueta y bovedilla fue introducido a finales de la década de 1970 en la industria de la construcción mexicana. Este sistema revolucionó los métodos constructivos para cubiertas y hasta hoy siguen ahorrando tiempo en la construcción de las obras debido a su simplicidad. Pese a su popularidad, algunas de las fallas más comunes que se han presentado en losas de vigueta y bovedilla se presentan principalmente porque no se toman las precauciones constructivas de apuntalamiento o porque alguna o algunas de las viguetas pretensadas que conforman el sistema no tienen las especificaciones requeridas (Tun, 1996).

Durante la etapa de la construcción de la losa de vigueta y bovedilla también se ha podido observar cómo los trabajadores realizan un sobreesfuerzo por subir las piezas aisladas de la losa, armarlas y forjarlas; este esfuerzo, la mayoría de las veces, es de poca importancia para las empresas constructoras, lo cual se ve reflejado en el incumplimiento de las normas mínimas de seguridad e higiene, traducéndose esto en lesiones para el trabajador, costos para la empresa y para el cliente, y demoras para el proyecto. Con respecto a esto último, se puede observar cómo en la construcción en general el 20% de los ingresos a las clínicas y hospitales por accidentes de trabajo provienen del oficio de albañil, dado que esta persona desempeña labores bajo cualquier clima y realiza esfuerzos físicos que superan el límite de su fuerza (Góngora, 2001).

Otros factores importantes que se pueden observar durante el proceso constructivo de la losa de vigueta y bovedilla están referidos, en primer lugar, a la cantidad de desperdicios que se genera, producto de la mezcla de concreto que no se utiliza, la cantidad de bovedillas destrozadas, los pedazos de puntales cortados, los pedazos de viguetas destrozados o cortados para ajustar las medidas de los claros, entre otros; en segundo lugar, a la seguridad física y de salud de los trabajadores, el personal administrativo de campo y los visitantes como producto de la poca limpieza e insalubridad que existe debajo de la losa apunta-

lada y de la obra en general; y, en tercer lugar, a la merma en la productividad y calidad del producto que se obtiene como resultado de todo lo anterior, tal y como se menciona en los antecedentes del trabajo realizado por Corona (1999).

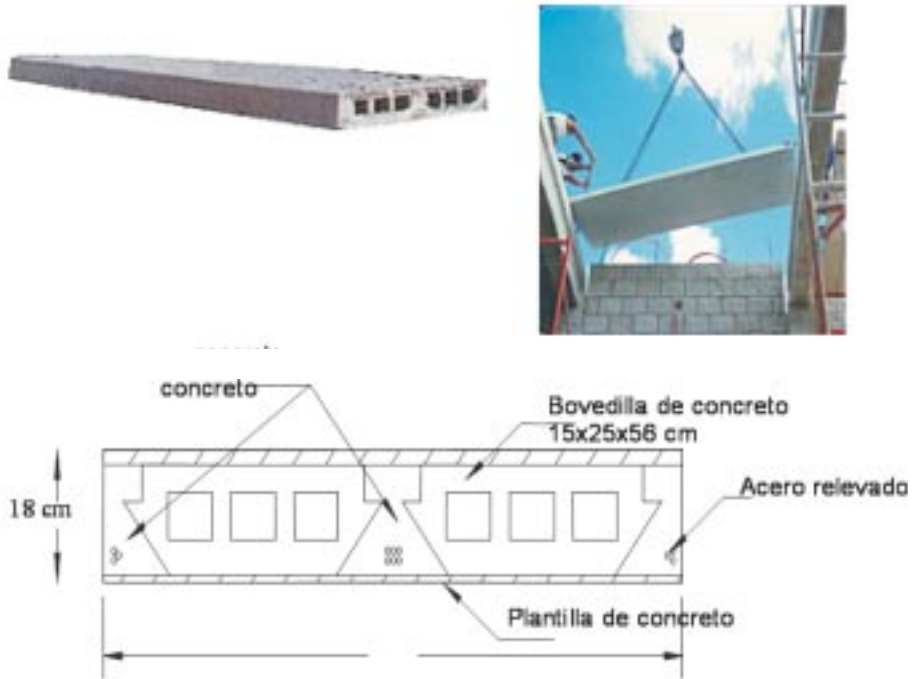
En los países desarrollados, la tendencia se dirige a que los procesos constructivos giren en torno a la prefabricación como una forma de desarrollo avanzado, industrializado y sustentable para la construcción. Esto se debe a que el empleo de esta técnica constructiva representa grandes ahorros, ventajas y beneficios tanto para las empresas constructoras, como para los clientes, la sociedad y el medio ambiente (Yee, 2001).

Por otro lado, así como hay factores que apoyan el empleo de la técnica de prefabricación como un método constructivo de múltiples beneficios, también es necesario comentar que hay estudios que revelan algunos factores que pueden afectar el uso de sistemas de concreto prefabricado (Arditi, 2000). En este estudio se muestra el efecto negativo que podría tener esta técnica si no se toman en cuenta los factores tales como las condiciones del mercado, los esfuerzos, los niveles de estandarización, el nivel de experiencia de las empresas constructoras, los problemas que puedan surgir durante el montaje, las políticas de la empresa y el nivel de comunicación entre las partes involucradas en la construcción.

En resumen, el empleo de la prefabricación como desarrollo tecnológico en los proyectos exige a las empresas un más alto nivel de ingeniería aplicada y de administración de los recursos que, en su conjunto, al ser utilizados de manera eficiente son capaces de ofrecerle al sistema prefabricado las siguientes ventajas:

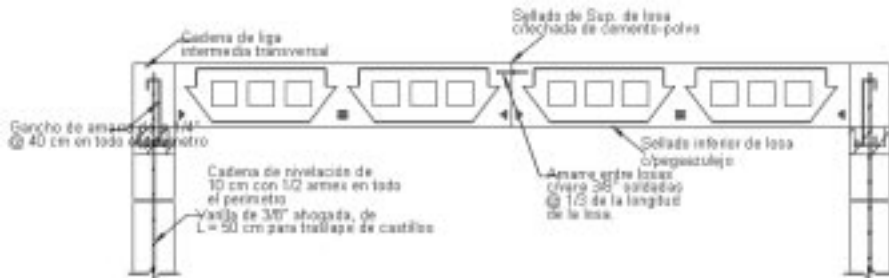
- El sistema de losa prefabricada descrita en este estudio podría ser una buena alternativa para los sistemas de cubierta en la fabricación masiva de vivienda, debido a que sus características físicas son muy parecidas al sistema de vigueta y bovedilla pero con algunas ventajas constructivas y estructurales (ABC, 2005): permitir un control de calidad más eficiente, reducir los tiempos de construcción y aumento de productividad, reducir la cantidad de materia prima utilizada, tener espacios más limpios y seguros en obra y cuidar el ambiente y la sociedad.
- La losa prefabricada L-18 (Figuras 1 y 2) es un sistema a base de nervios de concreto pretensados con alambre relevado de esfuerzos, los cuales hacen la función de las viguetas en el sistema de vigueta y bovedilla y bovedillas de concreto. Estos elementos son encofrados con concreto en una sola sección de un ancho (1.25 m) y peralte (18 cm) estándar, pero en longitudes variables según las medidas que se requieran fabricar, de tal manera que la losa queda integrada en una placa monolítica que es transportada directamente a obra.
- Los detalles constructivos que se deberán cuidar en este sistema son la cadena de enrase donde se colocará la losa L-18, la cual deberá estar bien nivelada a fin de aumentar la productividad en la fase de colocación y la soldadura transversal entre las placas.

Figura 1. Losa prefabricada L-18 y proceso de montaje



Fuente: presentación propia de los autores.

Figura 2. Detalles constructivos L-18



Fuente: presentación propia de los autores.

## 2. METODOLOGÍA

La investigación que se desarrolló fue de tipo exploratorio, donde la unidad de análisis cualitativa utilizada fue la losa de cubierta para una vivienda en obra negra, es decir, hasta el colado de la capa de compresión y, en términos cuantitativos, fue el metro cuadrado (m<sup>2</sup>); las muestras fueron no probabilísticas porque no hubo un proceso de selección formal y arbitrario de muestras dentro de una población

–como en el laboratorio–, pero a partir de los datos obtenidos durante la medición de las variables tiempo se hicieron inferencias sobre la población mediante el cálculo de parámetros estadísticos y curvas de distribución de probabilidad.

La metodología expuesta para esta investigación exploratoria consta de tres variables: tiempo, costo y calidad, las cuales fueron medidas en un proyecto ubicado en Playa del Carmen, México. Sobre esta diferencia de contextos, de costos y de tiempos que afectan a los recursos involucrados en el sistema constructivo, por efecto de los factores externos propios, se realizó un sondeo de mercado para el sistema de losa con el fin de validar los tiempos y costos observados y calculados.

Por último, los instrumentos de medición empleados para la evaluación de las variables en estudio fueron una cámara de video RCA modelo CC6351/CC6371, un cronómetro Casio, cédulas de registro y computadora personal de escritorio, equipada con la hoja de cálculo Microsoft Excel 2003®, el paquete estadístico SPSS® v. 10.0 y el sistema de simulación Stroboscope® (Kamat y Martínez, 2005).

Con ello se logró establecer el sistema de registro de datos referentes a los conceptos de obra involucrados dentro del proceso constructivo y a los tiempos para las actividades.

A fin de medir los datos que debían obtenerse para la realización de este estudio se creó una cédula de registro del tiempo que contiene información sobre las duraciones de inicio y terminación por ciclo de ejecución de una actividad. El número de ciclos promedio evaluado en la cédula fue de treinta; sin embargo, para aplicar la técnica de simulación, este número es relativo, pues dadas las características probabilísticas del simulador, pueden ser menos, ya que sólo se necesita identificar un dato con valor máximo y uno con valor mínimo (Halpin y Riggs, 1992). El registro también contiene el resumen estadístico del número de las observaciones registradas de la actividad y su histograma.

Con dichos registros se procedió a elaborar los modelos de operación, los cuales fueron la base para la programación de los modelos de simulación. Estos modelos permitieron la evaluación del proceso constructivo de manera individual y de forma masiva.

En el estudio del tiempo se registraron dos tipos de datos: los obtenidos por observación directa y los obtenidos por cuestionamiento. La forma en que se registraron los datos de tiempo en la cédula por observación directa (Figura 3) consistió en observar los videos grabados y anotar los tiempos de inicio y terminación de las actividades observadas en el proceso en cuestión. La segunda manera consistió en observar directamente las actividades en obra cronometrando y registrando los tiempos invertidos durante la ejecución de las mismas. Otro tipo de datos obtenidos y registrados para el sistema constructivo fueron los que se capturaron por encuesta directa al personal de la obra y a los administradores que tenían información del proceso constructivo de losa evaluado. Los datos de tiempo registrados de esta manera correspondieron a los conceptos de obra relacionados con la descompostura o

falla de la revolvedora, los tiempos perdidos por la falta de suministro de materia prima en obra, por traslado y limpieza de revolvedoras durante los colados, por la falta de suministro del prefabricado a obra, por la falla de los equipos en el montaje y por la falta de equipos para el colado. Estos datos fueron considerados para evaluar la influencia del contexto en la simulación masiva.

Figura 3. Cédula de registro y análisis de datos por actividad para la variable tiempo

**Cedula de registro de tiempos**

Actividad: \_\_\_\_\_

Unidad de medida: \_\_\_\_\_

Método: \_\_\_\_\_

---

Recursos utilizados: \_\_\_\_\_

Equipo y/o herramienta: \_\_\_\_\_

Materiales: \_\_\_\_\_

Otros: \_\_\_\_\_

---

Ciclo	Ubicación	Inicio			Fin			Total min	T min:seg
		Hr	Min	Seg	Hr	Min	Seg		
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									
19									
20									
21									
22									
23									
24									
25									
26									
27									
28									
29									
30									

**Datos estadísticos**

Sum

max

min

Media

D.E

Var

Rango

Intero

categorías

varianza

Análisis interio

**Datos histograma**

Intervalo	LJ	LS	Mi	Histograma
1	0.00	0.00	0	0
2	0.00	0.00	0	0
3	0.00	0.00	0	0
4	0.00	0.00	0	0
5	0.00	0.00	0	0
6	0.00	0.00	0	0
7	0.00	0.00	0	0
	0.00	0.00	0	0

**Datos actividades**

nº de losa observados = \_\_\_\_\_ nº apox

Vol. concreto / m³ de losa \_\_\_\_\_ m³ apox

Rendimiento: \_\_\_\_\_ 0.00 min/m³

Simbología: Col = colado, R = colado observado,

Lv = losa vigueta y bovedilla, m³ de la losa

Fuente: presentación propia de los autores.

Los datos registrados en las cédulas fueron capturados en los mismos formatos realizados en la hoja de cálculo donde ésta fue creada. Con estos datos se obtuvieron los parámetros estadísticos para cada una de las actividades de cada proceso constructivo de losa mediante las funciones estadísticas del sistema de hoja de cálculo. Con esta información, se analizó el comportamiento de la población de los datos para todas las actividades del proceso. Este análisis sirvió para determinar el tipo de curva de distribución de probabilidad al que correspondía

cada actividad y sus parámetros estadísticos reales según la curva resultante. Esta información sirvió para alimentar los modelos de simulación individual del proceso constructivo. El proceso para realizar el análisis de las curvas de distribución de probabilidad y los parámetros estadísticos reales para la simulación fue el siguiente:

1. Se capturaron de manera ordenada y agrupada todos los datos registrados manualmente en el formato de la cédula de registro prediseñada en una hoja de cálculo.
2. Con los datos anteriores se graficaron los histogramas del comportamiento de los datos, que sirvieron para tener una idea de la curva de distribución del comportamiento de la población de cada actividad en particular.
3. Se determinaron los parámetros estadísticos de los datos, valor máximo, mínimo, media, desviación estándar, rango, intervalo de categorías y ancho de intervalo, utilizando las funciones estadísticas disponibles y las expresiones de cálculo y criterios utilizados por Kelton y Averill. Dicha técnica consiste en comparar los histogramas de frecuencia, obtenidos de los datos observados –en este caso, las diferentes duraciones observadas en cada actividad–, con diferentes distribuciones de probabilidad teóricas, y luego escoger cuál de ellas se aproxima mejor a los datos observados (Kelton *et al*, 2000).
4. Se empleó un paquete estadístico con el cual se verificó el comportamiento poblacional de los datos de las actividades asociando a cada grupo de datos un tipo de distribución y observando la dispersión de la curva obtenida con estos datos contra la curva de distribución original que mostraba el software. Los parámetros estadísticos de la curva de probabilidad determinada con el paquete estadístico para cada grupo de datos del proceso constructivo objeto de análisis, se trasladaron nuevamente a una hoja de cálculo para ser utilizados como parámetro de guía para validar la información obtenida con el paquete estadístico.
5. Finalmente, se procedió a hacer la validación de la información obtenida en el paso anterior con el análisis de la dispersión de los datos por actividad, calculando numéricamente el área bajo curva del histograma obtenido con los datos originales en cada actividad, la cual fue comparada con cada una de las áreas de las curvas de distribución obtenidas en el paquete estadístico. De dicha comparación se obtuvieron diferencias de medias y desviaciones estándar para cada actividad y se verificó que para la curva de distribución elegida en cada actividad existía la menor diferencia en valor de las dispersiones de los parámetros estadísticos.

Otro tipo de análisis estadístico realizado fue el de los datos registrados por cuestionamiento directo a personal de la obra y expertos en el área, como por ejemplo los datos de tiempos muertos o perdidos en los procesos constructivos por factores externos propios del sistema constructivo. Estos análisis consistieron en capturar la información obtenida en formatos creados en hojas de cálculo, a los cuales se les

aplicaron las expresiones de cálculo para funciones estadísticas y matemáticas contenidas en este software para obtener los parámetros estadísticos que fueron utilizados en la simulación masiva, para involucrar la influencia del contexto.

Para elaborar el modelo gráfico de operación para los procesos identificados en la fabricación de sistema de techumbre estudiado. En esta etapa se observaron y analizaron las actividades resultantes del sistema constructivo de losa y se agruparon en procesos individuales, los cuales fueron la base para elaborar el modelo de simulación individual de cada sistema constructivo. Las actividades observadas para la creación de estos modelos fueron concebidas tomando en cuenta sólo el proceso de fabricación del sistema dentro de la obra, es decir, se consideró que los recursos se encuentran en la obra. En relación con lo anterior, se describieron las características bajo las cuales se observó el proyecto para este tipo de losa, características que fueron tomadas en cuenta en la simulación individual y masiva de dicho proceso constructivo.

### 3. RESULTADOS

De la observación del proceso constructivo de este sistema de losa se presenta en la Tabla 1 la descripción de cada una de las actividades contempladas dentro de cada partida observada para el sistema de la prefabricada L-18, así como la unidad de medida asociada a cada una de estas actividades.

Tabla 1 Partidas de actividades sistema losa prefabricada

Actividad	Unidad(es) de análisis	Descripción
Montaje	m <sup>2</sup>	Se refiere a la colocación de piezas prefabricadas sobre cadenas niveladas de concreto en muros de <i>block</i> mediante una grúa de piso. Luego se realizan maniobras de colocación, es decir, tiempos de traslado y cambio de posición.
Soldadura	m <sup>2</sup>	Consiste en la conexión entre piezas prefabricadas mediante conectores de varilla corrugada soldada a los tercios de la losa, con soldadora mecánica.
Preparación de la cubierta de la losa	m <sup>2</sup>	Contempla las actividades de sellado de juntas interiores y exteriores con mortero polvo-cemento y pegazulejo, colocación de malla de refuerzo y tendido de poliducto y cableado perimetral.
Preliminares 2: Actividades antes del colado	m <sup>2</sup>	Se refiere al total de tiempo invertido para juntar a la cuadrilla de trabajo, acarrear los elementos cemento y revolvedora y dejar listos los recursos - agua, cemento y agregados a utilizar.
Colado de la capa de compresión	m <sup>2</sup>	Contempla el colado de la superficie preparada con concreto premezclado bombeado.

Fuente: presentación propia de los autores.



En cada actividad se obtuvieron los concentrados de datos para cada partida observada. La Tabla 2 muestra a modo de ejemplo los resultados que se obtuvieron para la actividad de montaje.

El estadístico mostrado en la Tabla 3 se obtuvo del análisis del tiempo total observado y registrado en la cédula correspondiente a la etapa de montaje, el cual se tradujo a dos tiempos, el tiempo efectivo de montaje y el tiempo muerto. Este último dio como resultado, según lo observado directamente en obra, un tiempo perdido por movimientos de 125 minutos, equivalente a un 7.40% y un tiempo perdido por descomposturas o mantenimiento de 563 minutos, correspondientes a un 33.31%. Ambos tiempos dieron un resultado total de tiempo muerto de un 40.71% del total del tiempo medido, el cual resulta bastante elevado, ya que según la experiencia del experto en el área de montaje el porcentaje máximo de tiempo que se espera perder en esta etapa para este tipo de proyectos es de un 10%, el cual puede ser más o menos según las dificultades de acceso y maniobra encontradas en la obra.

Así mismo, la Figura 4 muestra los histogramas de frecuencia resultantes de las cuatro partidas.

Los tipos de distribución poblacional identificados para cada una de las actividades por partida, utilizando el paquete estadístico y las hojas de cálculo, se muestran en la Tabla 3.

Los estadísticos mostrados en las tablas 3 y 5 fueron medidos directamente en obra, comparando los tiempos de envío promedio sin demoras contra los envíos que llegaban retrasados a la obra y de los registros de salida y llegada de los camiones de carga a la planta. La importancia de estos tiempos está relacionada con las horas máximas, mínimas o promedio que pueden transcurrir sin que se envíen losas prefabricadas a una obra, debido a algún imprevisto externo durante el envío o por una causa interna durante la etapa de la carga de los camiones en la planta donde se fabrican.

Tabla 2. Partida de actividades sistema losa prefabricada

**Cedula de registro de tiempos**

<b>Actividad:</b>	Montaje de piezas prefabricadas de concreto	
	Losas pretensadas de 1.25 m de ancho, 18 cm de peralte y long. Variable	
(Actividad 1)	<b>Unidad de medida:</b>	m <sup>2</sup>
	<b>Método:</b> Losa prefabricada L-18	

**Recursos utilizados:**

M.O.-	1 operador de grúa + 1 ayudante + 3 Colocadores
Equipo y/o herramienta.-	Grúa de camión 25 ton, Herramienta menor (cincel, mazo, pala de cobra, etc)
Materiales.-	Diesel y aceite hidráulico
Otros.-	

Ciclo	m <sup>2</sup> Coloc.	Inicio			Fin			Total	T	Datos estadísticos			
		Hr	Min	Seg	Hr	Min	Seg						
1	4.933	2	55		3	5	10	2.0263	Sum	100.98			
2	5.875	3	5		3	12	7	1.1915	max.	6.13			
3	5.875	3	12		3	16	4		min	1.02			
4	5.875	3	16		3	28	12	2.0426	Media	2.01			
5	5.875	3	28		3	38	10	1.7921	D.E	1.19			
6	5.875	3	38		3	48	10	1.7921	Var	1.41			
7	1.44	3	48		3	53	5	3.4722	Rango	5.11			
8	1.44	3	53		3	57	4	2.7778	Interv	7.00			
9	5.875	3	57		4	20	23	3.9148	categorias	6.00			
10	5.875	4	20		4	30	10	1.7921	ran/cate	0.85			
11	5.875	4	30		4	37	7	1.1915	Ancho interv	0.43			
12	5.875	4	37		4	46	9	1.5319					
13	5.875	4	16		4	52	36	6.1277	<b>Datos histograma</b>				
14	2.85	4	52		5	5	13	4.9614	Intervalo	LI	LS	Mx	Histogra
15	2.394	5	5		5	9	4	1.6708	1	0.17	1.45	0.806511	0
16	1.44	5	9		5	17	8	5.5556	2	1.45	1.87	1.656574	9
17	70.5	8	0		12	50	290	4.1135	3	2.30	2.72	2.510638	11
18	2.875	13	10		13	15	5	1.7301	4	3.15	3.57	3.361702	3
19	3.23	13	18		13	24	6	1.8576	5	4.00	4.43	4.212766	3
20	4.25	13	25		13	30	5	1.1766	6	4.85	5.26	5.00383	1
21	1.45	13	30		13	34	4	2.7566	7	5.70	6.13	5.914694	1
22	1.45	13	35		13	37	2	1.3790					
23	3.625	13	37		13	41	4	1.1034	<b>Datos actividad</b>				
24	1.98	13	46		13	49	3	1.5152	Las losas son de	40	m <sup>2</sup> aprox		
25	2.75	13	49		13	54	5	1.8182	El total de datos observados	90	aprox		
26	4.25	13	55		14	2	7	1.6471	Rendimiento =	0.50	m <sup>2</sup> /min		
27	1.2	14	3		14	5	2	1.6867	El tonelaje de acero requerido por losa es				
28	4.5	14	5		14	18	13	2.8889					
29	1.8	14	20		14	23	3	1.6867					
30	3.57	15	35		15	40	5	1.4306					
31	4.25	15	41		15	47	6	1.4158					
32	4.25	15	48		15	53	5	1.1766					
33	4.25	15	54		15	59	5	1.1766					
34	4.25	16	2		16	12	10	2.3529					
35	4.25	16	12		16	20	8	1.8824					
36	36	8	50		10	30	100	2.7778					
37	36	10	50		12	5	75	2.0833					
38	5.875	12	50		13	1	11	1.8723					
39	5.875	13	2		13	9	7	1.1915					
40	5.875	13	9		13	14	5						
41	5.875	13	15		13	21	6	1.0213					
42	5.875	13	21		13	25	4						
43	4.935	13	25		13	29	4						
44	1.44	13	30		13	34	4	2.7778					
45	1.44	13	35		13	37	2	1.3889					
46	36	15	8		15	11	5						
47	5.875	15	18		15	31	13	2.2128					
48	40.07	15	24		17	30	128	3.1445					
49	30.34	12	20		13	33	73	2.4961					
50	1.675	14	28		14	35	7	4.1791					

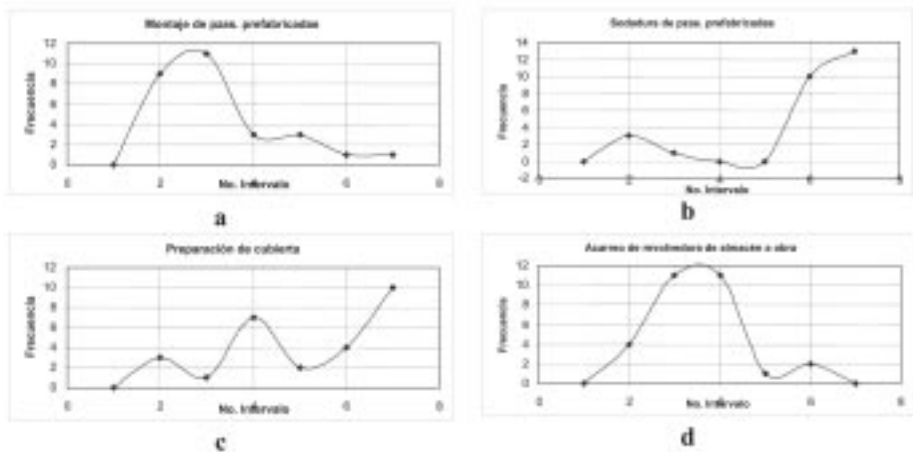
Fuente: presentación propia de los autores.

Se observa que el resultado obtenido para este punto de análisis fue del 16 % del total de horas observadas, el cual se obtuvo tomando en cuenta el tiempo de jornales perdidos por retraso o falta de envíos de losa durante el período de observación mostrado.

Los datos estadísticos presentados en la Tabla 6 representan el tiempo invertido por el movimiento de los equipos en obra durante la fabricación masiva de la losa, es decir, movimiento de los camiones de carga, de la grúa y de la olla de concreto y la bomba. Estos datos se obtuvieron de una de las cédulas donde se registraron los datos de tiempos correspondientes a este método de fabricación de losa. De este análisis se obtuvo que el tiempo promedio invertido en este tipo de movimientos fue de nueve minutos en promedio por cada movimiento realizado.

Aunque en la Tabla 6 se ha mostrado el tiempo muerto total para la etapa de montaje, a continuación se presenta en la Tabla 7 un dato estadístico aislado que resultó del análisis del tiempo perdido en obra por efectos de mantenimiento y reparación de la grúa. Los datos que sirvieron para este análisis también se tomaron de una cédula de registro del método en cuestión.

Figura 4. Detalle de los histogramas de frecuencia de las actividades observadas: montaje de piezas (a), soldaduras (b), preparación de losa (c) y acarreo (d).



Fuente: presentación propia de los autores.

Tabla 3. Tipos de distribución poblacional por partida losa prefabricada

Tipo de distribución	Etapas
Beta-PERT	Montaje
Triangular	Soldadura
Uniforme	Preparación de cubierta
Normal	Colado capa de compresión

Fuente: presentación propia de los autores.

Tabla 4. Dato estadístico del tiempo muerto en la etapa de montaje

<b>Tiempo total observado en la etapa del montaje =</b>	1690	Minutos								
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">Time (min)</th> <th style="text-align: center;">Tiempo en %</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">1002</td> <td style="text-align: center;">59.29%</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">688</td> <td style="text-align: center;">40.71%</td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">100.00%</td> </tr> </tbody> </table>	Time (min)	Tiempo en %	1002	59.29%	688	40.71%		100.00%	
Time (min)	Tiempo en %									
1002	59.29%									
688	40.71%									
	100.00%									
<b>Desglose del tiempo muerto</b>										
Total de tiempo perdido por movimientos =										
Total de tiempo perdido por descomposturas =										
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">Time (min)</th> <th style="text-align: center;">Tiempo en %</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">125</td> <td style="text-align: center;">7.40%</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">563</td> <td style="text-align: center;">33.31%</td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">40.71%</td> </tr> </tbody> </table>	Time (min)	Tiempo en %	125	7.40%	563	33.31%		40.71%	
Time (min)	Tiempo en %									
125	7.40%									
563	33.31%									
	40.71%									

Fuente: presentación propia de los autores.

Tabla 5. Dato estadístico del tiempo muerto por falta de suministro del prefabricado

<b>Jornales de trabajo observados:</b>	10 horas										
<b>Total de jornales contemplados =</b>	27										
Del 03 al 28 de Febrero del 2003	<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td style="text-align: center;">Hrs</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">270</td> </tr> </table>	Hrs	270								
Hrs											
270											
Total de jornales de trabajo = 27											
Total de jornales por falta de envíos = 3											
Total de jornales por demoras = 1.35											
⇒	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">Hrs</th> <th style="text-align: center;">Prob(%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">226.5</td> <td style="text-align: center;">83.89%</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">30</td> <td style="text-align: center;">11.11%</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">13.5</td> <td style="text-align: center;">5.00%</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">270</td> <td style="text-align: center;">100.00%</td> </tr> </tbody> </table>	Hrs	Prob(%)	226.5	83.89%	30	11.11%	13.5	5.00%	270	100.00%
Hrs	Prob(%)										
226.5	83.89%										
30	11.11%										
13.5	5.00%										
270	100.00%										

Fuente: presentación propia de los autores.

En la Tabla 7 se observa que el tiempo máximo que se puede invertir en una reparación de la grúa en obra es de 188 minutos y el tiempo mínimo por mantenimiento, es decir, revisión de aceites y mangueras de presión, es de 11 minutos.

Un último resultado estadístico importante durante la fabricación de este método prefabricado es el referido al retraso de la olla de concreto o de la bomba, tiempo que impacta directamente en la efectividad del método, ya que sin esta actividad la losa no se puede considerar terminada y, por tanto, no se podría comparar en igualdad de circunstancias en que fue medida la losa de vigueta y bovedilla.

Para crear la Tabla 8 se procedió a interrogar directamente a los chóferes de los camiones de concreto y las bombas en cuanto al tiempo máximo de retraso con el que el servicio completo de premezclado llegaría a la obra. Las respuestas obtenidas fueron cotejadas posteriormente mediante una visita directa a una planta de elaboración de concreto local y los resultados fueron muy similares.

Tabla 6. Datos estadísticos del tiempo invertido por movimiento de equipos

Estadísticos	Min/Jor	Min
Sum	0.231	125
max	0.031	17
min	0.006	3
Media	0.017	9
D.E.	0.008	4
Var	0.028	15

Tabla 7. Datos estadísticos del tiempo invertido por mantenimiento y reparación de grúa en obra

Estadísticos	Min/Jor	Min
Sum	1.043	563
max	0.348	188
min	0.020	11
Media	0.093	50
D.E.	0.116	83
Var	0.013	7

Fuente: presentación propia de los autores.

Tabla 8. Dato estadístico del tiempo perdido por retraso en el servicio del premezclado

Encuestados	Tiempo
1	45.00
2	35.00
3	55.00
4	50.00
5	30.00
6	30.00

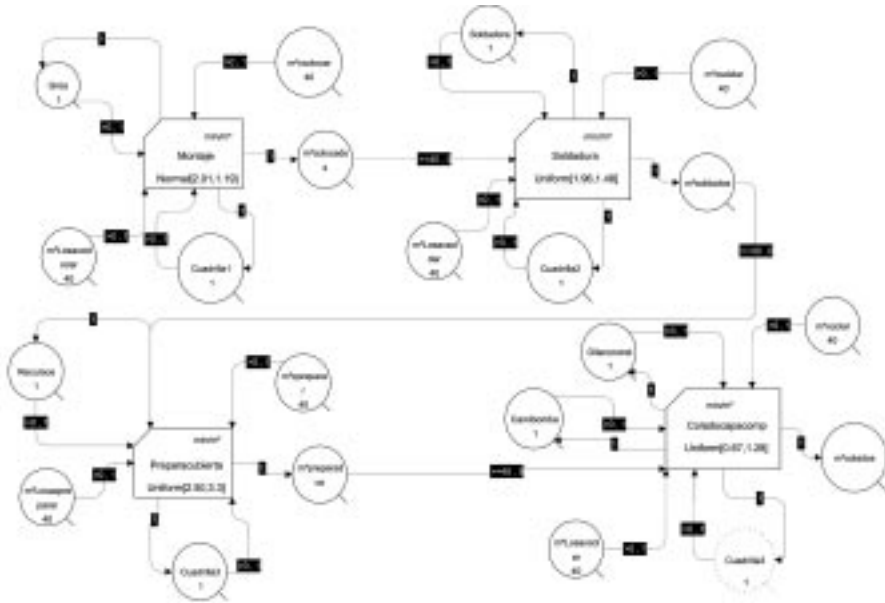
Estadísticos	(min)	(hrs)	Jornal
max	55.00	0.92	0.10
min	30.00	0.50	0.06
Prom	40.83	0.68	0.08
D.E.	10.68	0.18	0.02

Fuente: presentación propia de los autores.

De la información anterior se obtuvo que el tiempo promedio de retraso del servicio de premezclado fue de 40.83 minutos y que la probabilidad de que se diera este retraso es de un 30%, según el encargado de programar los envíos de la planta de concreto visitada. Por último, se encontró que la cantidad de equipos que se asignarían a un proyecto de las características del estudio era de seis ollas y tres bombas camión.

Como se estableció en la metodología, los modelos gráficos que se muestran en esta sección representan la transcripción de las actividades observadas en cada uno de los procesos constructivos de losa a modelos operativos que agrupan una cantidad de actividades en un elemento básico de simulación llamado “combi”, el cual se conecta a otros elementos que contienen las cantidades de recursos demandas (ques) para realizar la simulación de cada modelo individual (Kartman, Martínez, 2005). Todas las actividades que conforman el modelo operativo están interconectadas mediante el uso de conectores de dependencia principio-fin que forman el modelo total de simulación individual. Los elementos básicos de simulación se muestran en la Figura 5.

Figura 5. Modelo de simulación propuesto para el sistema L-18



Fuente: presentación propia de los autores.

Al ejecutar la simulación para este sistema de losa utilizando el programa de simulación *Stroboscope* se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 9. Por un lado, se muestran las cantidades de los recursos que se emplean dentro de cada actividad involucrada en el sistema completo de fabricación de la losa de vigueta y bovedilla, cantidades que se pueden tomar en cuenta al hacer el análisis de costos. Por otro lado, se describe la información de mayor importancia para la variable tiempo, ya que esta parte contempla los datos estadísticos de tiempo primer inicio, último inicio y tiempo promedio de cada concepto principal dentro del modelo, los cuales fueron la base en la simulación masiva de vivienda.

El resultado obtenido en la simulación de este modelo fue el siguiente: el tiempo que se tarda en producir una losa prefabricada de acuerdo con las etapas evaluadas con un solo equipo de trabajo, es decir, una grúa, una cuadrilla de montaje, una cuadrilla de soldadores con un equipo de soldadura, una cuadrilla de personal de obra que prepara la cubierta y un camión bomba de concreto es de 299.18 minutos, lo que equivale en jornales de nueve horas de trabajo a 0.5 días aproximadamente, tiempo que también coincidió con lo observado en la obra.

Tabla 9. Resultados de cantidades de recursos y tiempos por unidad de losa prefabricada

Simulation Model (prefa.mxl) (301200476)  
 Statistics report at simulation time 299.115

RECURSOS								
Resource	Res	Car	Tot	AvWthr	AvCost	SDCost	MinCost	MaxCost
Camborito	423	1	41	6.36	0.67	0.34	0	1
Cuebrillo1	423	1	41	6.34	0.73	0.44	0	1
Cuebrillo2	423	1	41	5.66	0.78	0.42	0	1
Cuebrillo3	423	1	41	1.82	0.48	0.5	0	1
Gruta	423	1	41	5.34	0.73	0.44	0	1
Colonovent	423	1	41	6.36	0.67	0.34	0	1
Recursos	423	1	41	4.54	0.62	0.48	0	1
Soldadores	423	1	41	5.66	0.78	0.42	0	1
pl/Loasacotar	423	0	40	278.23	37.33	6.13	0	48
pl/Loasocoblar	423	0	40	39.02	5.22	10.26	0	48
pl/Loaspagalar	423	0	40	202.4	37.06	15.77	0	48
pl/Loasoblar	423	0	40	113.34	15.15	17.8	0	48
pl/acalar	423	40	40	19.96	2.84	7.69	0	48
pl/acoblar	423	40	40	258.15	34.51	10.03	0	48
pl/acoblarob	423	40	40	83.66	12.56	15.56	0	48
pl/acoblarob	423	40	40	164.17	24.62	17.86	0	48
pl/acotar	423	0	40	278.23	37.33	6.13	0	48
pl/acotar	423	0	40	39.02	5.22	10.26	0	48
pl/acopalar	423	0	40	202.4	37.06	15.77	0	48
pl/acoblar	423	0	40	113.34	15.15	17.8	0	48

CONCEPTOS											
Activity	Tot	TotR	LeRR	AvDur	SDDur	MinD	MaxD	AvRd	SDRd	MinR	MaxR
Colabocapomp	40	280.02	206.13	0.96	0.17	0.69	1.25	0.96	0.17	0.69	1.28
Avilaje	40	0	76.1	2.61	1.88	0	3.87	2.63	1.89	0	3.92
Presentocubierta	40	147.58	258.12	2.83	0.23	2.5	3.29	2.83	0.23	2.5	3.29
Soldadores	40	80.3	148.98	1.88	0.14	1.48	1.96	1.88	0.14	1.48	1.98

The Future Events List is empty at simulation time 299.115

Fuente: presentación propia de los autores.

#### 4. DISCUSIÓN

En este trabajo no se profundizó en el estudio comparativo del sistema L-18, contra el sistema tradicional de construcción de losas que prevalece en la región. Lo anterior, sin embargo, no invalida los resultados obtenidos del modelo computacional. Hay que tener en cuenta también que esta es la primera vez que se utilizan técnicas de simulación con este sistema constructivo con propósitos de observación y de experimentación.

Lo que sigue a continuación es elaborar un modelo de simulación usando la metodología sugerida en este estudio. Una vez determinados los factores y los tiempos que intervienen en el sistema constructivo tradicional se tienen que comparar los resultados de dicho modelo contra los que se presentan en este trabajo.

Para encontrar si el sistema L-18 es una alternativa económicamente susceptible de ser aceptada de manera generalizada por cualquier empresa, se tienen que tomar en cuenta tres aspectos importantes: (a) el costo de inversión directa en el sistema, (b) el ahorro potencial en tiempo reflejado en los costos indirectos, tanto en operación como en los de administración de oficina central y (c) comparar los factores y estrategias de planificación que se utilizan para implantar el sistema

aquí estudiado ya de manera masiva. Si en dicha comparación se revelan ventajas económicas que los constructores pueden considerar atractivas, podrán decidir entre una u otra de las alternativas que consideren.

## 5. CONCLUSIONES

Se observó que una cuadrilla de soldadores con un equipo de soldadura, una cuadrilla de personal de obra que prepara la cubierta y un camión bomba de concreto invierten 299.18 minutos, lo que equivale en jornales de nueve horas de trabajo a 0.5 días aproximadamente, para la realización de un ciclo completo. Ante estos resultados, se puede decir que tanto los datos del modelo de proceso, como la secuencia de precedencia de actividades, son una representación aceptablemente aproximada de la realidad. Además se observó que el proceso para la construcción de la losa L-18 no requiere del tiempo necesario para colocar un sistema de cimbras (tres a cuatro jornales), la logística previa a la elaboración del concreto (un jornal), así como un número más reducido de obreros en la cuadrilla de fabricación en el sitio de la obra, comparado con el método tradicional (Corona, 1999). Esto representa un ahorro significativo tanto en costo como en tiempo de construcción, si el método es utilizado de manera masiva (Sosa, 2005).

Las técnicas de modelación presentadas en este trabajo pueden utilizarse como bases para establecer una metodología que parta del análisis individual de cada sistema constructivo dentro de cada proyecto por realizar. Eventualmente permitirán hacer una comparación entre métodos de construcción de losas, para optimizar los tiempos y los costos de ambos procesos constructivos en función de la cantidad de los recursos empleados dentro de cada proceso constructivo de losa. Se hace especial hincapié en que las tecnologías de simulación computarizada son adecuadas para revisar nuevos métodos constructivos, ahorrando tiempo de experimentación en obra (Arditi, 2000).

## AGRADECIMIENTOS

Este estudio contó con la colaboración de la empresa ABC, Agregados y Bloques Cancún, la cual aprobó la publicación de estos resultados.

## REFERENCIAS

- ABC. Agregados y Bloques Cancún S.A, [web en línea]. <http://www.abc-cancun.com/data/especificatres.htm> [Consulta: 14-8-2006]
- ARDITI, D. y ULUC, E. Factors affecting the use of precast concrete systems. *Journal of Architectural Engineering (NY)*. 2000, vol. 6, núm. 3, p. 79-80.
- CORONA S., Gilberto A. *Cambio de método y de control de materiales en la construcción en serie de viviendas de interés social y su impacto en la calidad*, Mérida: UADY, 1999.



- GÓNGORA M., Eloína Graciella. *Selección y evaluación de un tipo alternativo de cimentación en la construcción masiva de viviendas*. Mérida: UADY, 2003.
- HALPIN, Daniel y RIGGS, Leland. *Planning and Analysis of Construction Operations*. Indianapolis: John Wiley & Sons, 1992, 381 p. ISBN 0-471-55510-X.
- KAMAT, V. R. y MARTINEZ, J. C. Dynamic 3D Visualization of Articulated Construction Equipment. *Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE*. 2005, vol. 19, núm. 4, p. 356-368.
- LAW AVERILL, Kelton David. *Simulation Modeling and Analysis*. 3a ed. New York: Mc Graw Hill, 2000. 0-07-059292-6
- SOSA CANTO, Jorge A. *Evaluación técnico-económica entre dos tipos de losa mediante un proceso de simulación*. Mérida: UADY, 2005.
- TUN T., José Florentino. *Fallas estructurales típicas de la región yucateca*. Mérida: UADY, 1996.
- YEE A., Alfred. Structural and economic benefits of precast/prestressed concrete construction. *Pc Journal (Illinois)*. 2001, vol. 46, núm. 4, p. 34-42.